



ΕΘΝΙΚΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ
ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων με τη
μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες
φερρομαγνητικών συγκολλημένων χαλύβων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Σταθάρα Ελευθερίου - Χρήστου

Ερευνητικός Επιβλέπων:	Ακαδημαϊκός Επιβλέπων:
Ε. Χριστοφόρου Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.	Κ. Παρασκευαΐδης Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος, 2014

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν να ανταπεξέλθω στην προσπάθεια ολοκλήρωσης της. Έτσι υπάρχουν καθηγητές, συνεργάτες, συγγενείς και φίλοι που θα ήθελα να ευχαριστήσω για την πολύτιμη βοήθεια τους.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Ευάγγελο Χριστοφόρου, καθηγητή στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, για την καθοδήγηση του και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον θέμα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα Ξένια Βουρνά για την πολύτιμη βοήθεια της τόσο κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών τόσο και για την συζήτηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ευχαριστώ επίσης την συμφοιτήτρια μου Ελένη Μαγγιώρου για τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας που με βοήθησαν να δω θέματα της τεχνολογίας υλικών από άλλη σκοπιά.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο Βασίλη Στεργίου, τομεάρχη του εργαστηρίου φυσικών επιστημών στην ΕΑΒ και τον κο Καλογερόπουλο Σταύρο, ειδικό προγραμματισμού στο εργαστήριο ερευνών προηγμένων σύνθετων υλικών της ΕΑΒ, για την διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου Κατερίνα Τόλη και Βασίλη Γκίκα για την υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στο αδελφό μου και τους γονείς μου για την υλική και ηθική στήριξη που μου παρείχαν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση μαγνητικών μη-καταστροφικών μεθόδων (Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen και βρόχος υστέρησης) για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας της συγκόλλησης δοκιμιών υποευτηκτοειδούς χάλυβα ποιότητας AISI 1008. Η αυτογενής τεχνική συγκόλλησης που επιλέχθηκε για την ένωση των μεταλλικών μερών του χάλυβα ήταν η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding, EBW).

Για τον μικροδομικό χαρακτηρισμό κάθε ζώνης συγκόλλησης κόπηκαν δοκίμια και παρατηρήθηκαν στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Επίσης έγινε ταυτοποίηση των φάσεων από το ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ. Σκοπός της περεταίρω μελέτης του συγκολλημένου δοκιμίου ήταν η συσχέτιση της μικροδομής με τις μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων του δείγματος.

Ακόμα έγινε προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μαγνητική τεχνική Barkhausen. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με πειραματικές μετρήσεις παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ και νετρονίων. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία της μαγνητικής απόκρισης.

Η συσχέτιση της μικροδομής με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων έδειξε ότι η μέγιστη τιμή του μαγνητικού θορύβου παρουσιάζεται στη ζώνη τήξης. Με την απομάκρυνση από τη ζώνη τήξης ο μαγνητικός θόρυβος παρουσίασε μια ταχύτατη μείωση και έλαβε την ελάχιστη τιμή του στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

ABSTRACT

For the current essay, the quality and the reliability of the welding of a hypoeutectoid AISI 1008 steel was checked using magnetic non-destructive methods (Barkhausen noise and hysteresis loop). The autogenous welding technique chosen was the Electron Beam Welding (EBW)

For the microstructural characterization of every zone of the welding, specimens were cut and observed under the optical and scanning electron microscope. Also the identification of the phases of the steel was made using X-ray Diffraction. The aim of further study of the welded specimen was the correlation of microstructure with the changes of its magnetic properties.

Furthermore, the residual stress of the specimens was determined using the Barkhausen technique. The results of these measurements were compared with the experimental residual stress measurements using X-ray and neutron diffraction. Comparing the results, the reliability of the magnetic measurements was confirmed.

The correlation of microstructure with the distribution of residual stresses showed that the maximum value of the magnetic noise occurs in the melting zone of the welded specimens. As the measurements move away from the melting zone, the magnetic noise presented a rapid decline and reached its minimum value in the heat affected zone.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	III
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IV
ABSTRACT	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	VI
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	XII
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XIX
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	1
1.1 Ορισμοί.....	1
1.1.1 Παραμένουσες τάσεις (residual stresses)	1
1.1.2 Ορθές παραμένουσες τάσεις (normal residual stresses).....	1
1.1.3 Διατμητικές παραμένουσες τάσεις (shear residual stresses)	2
1.1.4 Τρισδιάστατη εντατική κατάσταση	3
1.2 Σημασία της ανάλυσης και του προσδιορισμού των παραμένουσων τάσεων.....	3
1.3 Προέλευση των παραμενουσών τάσεων.....	5
1.4 Κατάταξη των παραμενουσών τάσεων.....	7
1.5 Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις	9
1.6 Μέθοδοι μέτρησης των παραμένουσων τάσεων.....	11
1.6.1 Μηχανικές μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων	12
1.6.1.1 Μέτρηση μέσω καμπυλότητας (curvature)	12
1.6.1.2 Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπής (hole drilling).....	13
1.6.1.3 Μέτρηση μέσω ενδοτικότητας (compliance method).....	14
1.6.2 Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων με διάθλαση	14

1.6.2.1	Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam diffraction)	14
1.6.2.2	Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ακτίνων X (X-ray diffraction)	15
1.6.2.3	Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης νετρονίων (neutron beam diffraction)	15
1.6.2.4	Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης «σκληρών» ακτίνων X (hard X-ray diffraction)	15
1.6.3	Άλλες μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων	16
1.6.3.1	Μαγνητικές και ηλεκτρικές τεχνικές	16
1.6.3.2	Υπερηχητικές τεχνικές (ultrasonics)	16
1.6.3.3	Θερμοελαστικές μέθοδοι	17
1.6.3.4	Φωτοελαστικές μέθοδοι	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΕΥΤΙΚΤΟΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΑΣ		18
2.1	Χάλυβες	18
2.2	Διάκριση χαλύβων	18
2.2.1	Ως προς τη χημική τους σύσταση	18
2.2.2	Ως προς τον προορισμό τους	18
2.2.3	Ως προς τις εφαρμογές τους	18
2.2.4	Ως προς την κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (C)	19
2.3	Φάσεις και μικροδομικά συστατικά που εμφανίζονται στο διάγραμμα ισορροπίας Fe - Fe ₃ C	20
2.3.1	Φερρίτης	20
2.3.1.1	α-φερρίτης ή α- Fe	20
2.3.1.2	δ-φερρίτης ή δ- Fe	22
2.3.2	Ωστενίτης (γ-φάση, γ-Fe)	22
2.3.3	Σεμεντίτης (Fe ₃ C)	23
2.3.4	Λεδεμβρουρίτης (ωστενίτητης + σεμεντίτης, γ-Fe + Fe ₃ C)	24

2.3.5	Περλίτης (φερρίτης + σεμεντίτης, α -Fe + Fe ₃ C)	25
2.3.6	Μαρτενσίτης (martensite).....	27
2.3.7	Μπαινίτης (Bainite)	28
2.3.7.1	Ανώτερος μπαινίτης (upper bainite)	29
2.3.7.2	Κατώτερος μπαινίτης (lower bainite).....	29
2.4	Υποευτηκτοειδής Χάλυβας.....	30
2.4.1	Γενικά χαρακτηριστικά	30
2.4.2	Ονοματολογία χαλύβων σύμφωνα με την Society of Automotive Engineers (SAE) και την American Iron and Steel Institute (AISI)	31
2.4.3	Ταξινόμηση ανθρακούχων χαλύβων	32
2.4.4	Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ανθρακούχους χάλυβες	33
2.4.4.1	Μαγγάνιο.....	33
2.4.4.2	Πυρίτιο	34
2.4.4.3	Άνθρακας	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ		35
3.1	Εισαγωγή	35
3.2	Μεθοδολογία.....	35
3.3	Διαστασιολογικός έλεγχος δειγμάτων	36
3.3.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού που παρελήφθη	36
3.3.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συγκολλημένου δείγματος	37
3.4	Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων.....	39
3.4.1	Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen	39
3.4.1.1	Διάταξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen.....	39
3.4.1.2	Τρόποι μέτρησης της απόκρισης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	

3.4.1.2.1	Γραμμικές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	41
3.4.1.2.1	Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	41
3.4.2	Βρόχοι μαγνητικής υστέρησης	42
3.4.2.1	Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου	42
3.5	Προσδιορισμός κατανομής παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα δοκίμια	47
3.5.1	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	47
3.5.2	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD)	47
3.5.3	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων	48
3.6	Μεταλλογραφικός-Μικροδομικός χαρακτηρισμός των συγκολλημένων δειγμάτων	51
3.6.1	Απαίτηση για περαιτέρω μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό του υλικού	51
3.6.2	Προετοιμασία δειγμάτων	52
3.6.2.1	Κοπή δοκιμίων	52
3.6.2.2	Εγκιβωτισμός	52
3.6.2.3	Λείανση	53
3.6.2.4	Στίλβωση	53
3.6.2.5	Χημική προσβολή	53
3.6.3	Μέθοδοι Μικροδομικού χαρακτηρισμού	54
3.6.3.1	Οπτικό Μικροσκόπιο (OM)	54
3.6.3.2	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	55
3.6.3.3	Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)	56

3.6.3.4	Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction)	56
3.7	Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων.....	57
3.7.1	Απαίτηση για περαιτέρω μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων	57
3.7.1.1	Δοκιμές μακρο-σκληρομέτρησης.....	57
3.7.1.2	Δοκιμές μικρο-σκληρομέτρησης.....	58
3.7.1.3	Δοκιμές εφελκυσμού	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		59
4.1	Εισαγωγή	59
4.2	Οπτικός έλεγχος συγκολλημένων δοκιμίων	59
4.3	Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων.....	59
4.3.1	Χωρική κατανομή των γραμμικών σημειακών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	59
4.3.2	Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	62
4.3.3	Μέτρηση βρόχων υστέρησης	63
4.3.4	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen	65
4.3.5	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD).....	66
4.3.6	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων	69
4.3.7	Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω οπτικού μικροσκοπίου	71
4.3.8	Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)	73
4.3.9	Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy).....	79
4.3.10	Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction).....	82
4.3.11	Μακρο-σκληρομέτρησης.....	83
4.3.12	Μικρο-σκληρομέτρησης.....	83

4.3.13	Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σ - $\epsilon\%$).....	83
4.3.14	Θραυστογραφίες	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		88
5.1	Εισαγωγή	88
5.2	Συσχέτιση κατανομής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων	88
5.3	Συσχέτιση μαγνητικών παραμέτρων με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων 90	
5.4	Συσχέτιση μικροδομικών αλλαγών με τις μαγνητικές μετρήσεις και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων	92
5.5	Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων με τη μικροδομή, τις μαγνητικές ιδιότητες και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων.....	94
5.6	Συνοπτικά συμπεράσματα	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....		95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΦΟΡΕΣ		97

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Απεικόνιση των ορθών τάσεων στην στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα υλικό (α) σε δύο διαστάσεις και (β) σε τρεις διαστάσεις.	1
Εικόνα 1-2: Απεικόνιση στο χώρο των διατμητικών τάσεων στην στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα υλικό σε τρεις διαστάσεις.	2
Εικόνα 1-3: (α) Θετικές διατμητικές τάσεις και (β) αρνητικές διατμητικές τάσεις.	2
Εικόνα 1-4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του τασικού πεδίου στην στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα στερεό υλικό.	3
Εικόνα 1-5: Εύρος τασικού πεδίου σε σύγκριση με τις διαστάσεις των μικροδομικών ατελειών. [1].....	5
Εικόνα 1-6: Προέλευση παραμενουσών τάσεων [1-2]......	6
Εικόνα 1-7: Παραδείγματα διαφόρων τρόπων με τους οποίους μπορούν να δημιουργηθούν παραμένουσες τάσεις σε ένα υλικό. [3].....	8
Εικόνα 1-8: Είδη παραμενουσών τάσεων ως προς την κλίμακα στην οποία αναπτύσσονταν. [4]	9
Εικόνα 1-9: Κατάταξη παραμενουσών τάσεων ανάλογα με τη διάταξή τους στο χώρο (α) μονοαξονική (1-D), (β) διαξονική (2-D) και (γ) τριαξονική (3-D) παραμένουσα τάση.	9
Εικόνα 1-10: Εμφάνιση παραμένουσων τάσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.	10
Εικόνα 1-11: Κατανομή των παραμενουσών τάσεων λόγω της επίδρασης διαφόρων μεταλλουργικών διαδικασιών κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. [5].....	11
Εικόνα 1-12: Μέθοδοι μέτρησης των παραμένουσων τάσεων. [6].....	12
Εικόνα 1-13: Μέτρηση παραμενουσών τάσεων μέσω καμπυλότητας.	13
Εικόνα 1-14: Εντατική κατάσταση (α) πριν και (β) μετά τη διάνοιξη την οπής.	13
Εικόνα 2-1: Διμερές διάγραμμα φάσεων Fe- C.....	19
Εικόνα 2-2: (α) Τυπική μικροδομή φερρίτη (ανοιχτόχρωμες περιοχές), (b) κυβικό χωροκεντρομένο (BCC) κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και το άτομο το ανθρακα παρουσιάζεται ως κόκκινη σφαίρα στο κέντρο του κύβου.	20

Εικόνα 2-3: Παρουσία βήτα-φερρίτη (β -Fe) πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A2 (θερμοκρασία Curie). Ο α -Fe είναι φερρομαγνητικός ενώ ο β -Fe είναι παραμαγνητικός, όπως και ο γ -Fe.....	21
Εικόνα 2-4: (a) Τυπική μικροδομή οστενίτη, (b) κυβικό ενδοκεντρωμένο (FCC) κρυσταλλικό πλέγμα του οστενίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και τα άτομα του ανθρακα παρουσιάζονται ως κόκκινες σφαίρες στο κέντρο των εδρών του κύβου.....	23
Εικόνα 2-5: Ορθορομβικό σύστημα στο οποίο κρυσταλλώνεται ο σεμεντίτης.	24
Εικόνα 2-6: Διαφορετικές μορφολογίες του σεμεντίτη. (α) Πλακοειδής σεμεντίτης και (β) σφαιροποιημένος σεμεντίτης.....	24
Εικόνα 2-7: Τυπική μικροδομή του περλίτη.	27
Εικόνα 2-8: Σχηματισμός περλίτη (pearlite), ανώτερου (upper) και κατώτερου (lower) μπαινίτη.	30
Εικόνα 2-9: Τυπική μικροδομή φερριτοπερλιτικού χάλυβα.	31
Εικόνα 3-1: Δείγμα αναφοράς χάλυβα AISI 1008.	36
Εικόνα 3-2: Συγκολλημένα δοκίμια AISI 1008 χάλυβα με μέθοδο EBW. Στην εικόνα σημειώνονται οι διευθύνσεις της έλασης (RD) και της συγκόλλησης (WD).....	37
Εικόνα 3-3: Διαστάσεις της εκάστοτε ζώνης συγκόλλησης στο συγκολλημένο δοκίμιο.	38
Εικόνα 3-4: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.	39
Εικόνα 3-5: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο του τριγωνικού σήματος διέγερσης που εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης συχνότητας 10Hz και πλάτους, από κορυφή σε κορυφή, 14V.....	39
Εικόνα 3-6: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο μιας σημειακής ενδεικτικής μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινη κυματομορφή) στη επιφάνεια συγκολλημένου δείγματος.....	40
Εικόνα 3-7: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.	40

Εικόνα 3-8: Σημεία γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος.	41
Εικόνα 3-9: Πολικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης.	42
Εικόνα 3-10: Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.	42
Εικόνα 3-11: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.	43
Εικόνα 3-12: Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.	44
Εικόνα 3-13: Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης της διάταξης του υστερησιογράφου.	45
Εικόνα 3-14: Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης της διάταξης του υστερησιογράφου.	45
Εικόνα 3-15: Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.	46
Εικόνα 3-16: Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού.	46
Εικόνα 3-17: Κρυσταλλογραφικά επίπεδα στην επιφάνεια πολυκρυσταλλικού υλικού. .	48
Εικόνα 3-18: Προσδιορισμός παραμένουσων τάσεων με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας νετρονίων.	49
Εικόνα 3-19: (α) Γεωμετρία διέλευσης για τον προσδιορισμό της εγκάρδιας (transversal) και διαμήκους (longitudinal) παραμόρφωσης και (β) Γεωμετρία ανάκλασης για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων κάθετα στην επιφάνεια του δείγματος. Για την μέτρηση των άνωθεν αναφερόμενων παραμορφώσεων, μελετάται διαφορετικός όγκος υλικού (Sample Gauge Volume).	49
Εικόνα 3-20: Προσδιορισμός του διανύσματος σκέδασης, Q.	50
Εικόνα 3-21: Θέσεις του συγκολλημένου δείγματος ως προς την προσπίπτουσα και την ανακλώμενη δέσμη νετρονίων για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων/τάσεων (α) εγκάρσιων (transverse) στη διεύθυνση της συγκόλλησης, (β) παράλληλων (longitudinal)	

στη διεύθυνση της συγκόλλησης και (γ) κάθετων στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος.....	50
Εικόνα 3-22: Θέσεις προσδιορισμού των παραμένουσων τάσεων στο συγκολλημένο δείγμα AISI 1008 με τη μέθοδο EBW. Στην ίδια εικόνα εμφανίζονται και οι διευθύνσεις όπου προσδιορίζονται οι παραμένουσες τάσεις σύμφωνα με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων.....	51
Εικόνα 3-23: Οπτικό μικροσκόπιο τύπου OLYMPUS BX41-M.	55
Εικόνα 3-24: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV... ..	56
Εικόνα 3-25: Περιθλασίμετρο ακτίνων X σάρωσης (SEM) τύπου Brucker D8 Focus... ..	57
Εικόνα 4-1: Απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στο συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με EBW ως μέθοδο συγκόλλησης, όταν το πεδίο εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης.....	60
Εικόνα 4-2: Μορφή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινο χρώμα) από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	61
Εικόνα 4-3: Ενδεικτικά πολικά διαγράμματα όπου απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης στο βασικό μέταλλο (Base Metal), στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone) και στη ζώνη τήξης (Fusion Zone).....	62
Εικόνα 4-4 : Μορφή των ελασσόνων βρόχων υστέρησης από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	64
Εικόνα 4-5 : Μορφή μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	65
Εικόνα 4-6: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό των παραμένουσων τάσεων στον AISI 1008 χάλυβα. Η καμπύλη προέρχεται από την μέτρηση του υλικού αναφοράς.65	
Εικόνα 4-7: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο MBN στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.	66

Εικόνα 4-8: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο XRD στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.	66
Εικόνα 4-9: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους MBN και XRD στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.	67
Εικόνα 4-10: Θερμοκρασιακός κύκλος θερμικά επηρεασμένης ζώνης για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW.	68
Εικόνα 4-11: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό των παραμένουσων τάσεων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη στο συγκολλημένο χάλυβα AISI 1008. Η καμπύλη προέρχεται από την μέτρηση ανοπτημένο υλικό αναφοράς σύμφωνα με το θερμοκρασιακό κύκλο.	68
Εικόνα 4-12: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους MBN και XRD στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW. Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο καμπύλων βαθμονόμησης.	69
Εικόνα 4-13: Προσδιορισμός των παραμένουσων τάσεων στη θέση (α) $Z = 50$ και (β) $Z=100$ για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.	70
Εικόνα 4-14: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους MBN, XRD και Neutron στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.	71
Εικόνα 4-15: Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης.	72
Εικόνα 4-16: Εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή του μετάλλου βάσης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.	73
Εικόνα 4-17: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή του μετάλλου βάσης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.	74
Εικόνα 4-18: Ενδεικτική μέτρηση (α) του μεγέθους ενός περλιτικού κόκκου και (β) της ενδολαμικής του απόστασης.	75

Εικόνα 4-19: Εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.....	76
Εικόνα 4-20: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.....	77
Εικόνα 4-21: Ενδεικτική μέτρηση της ενδολαμικής απόστασης του χοντροκρυσταλλικού περλίτη.....	78
Εικόνα 4-22: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από τη ζώνη τήξης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW σε μεγεθύνσεις (α) x1000 και (β) x2500.....	79
Εικόνα 4-23: Ενδεικτική γενικευμένη χημική μικροανάλυση στο μέταλλο βάσης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	79
Εικόνα 4-24: Ενδεικτική σημειακή χημική μικροανάλυση στο μέταλλο βάσης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	80
Εικόνα 4-25: Ενδεικτική σημειακή χημική μικροανάλυση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	81
Εικόνα 4-26: Ενδεικτική σημειακή χημική μικροανάλυση στη ζώνη τήξης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.....	81
Εικόνα 4-27 : Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας του μετάλλου βάσης και ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης.....	82
Εικόνα 4-28 : Ρομβοειδές αποτύπωμα μακροσκληρομέτρησης στο μέταλλο βάσης.....	83
Εικόνα 4-29 : Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης του δοκιμίου που παρελήφθη και του συγκολλημένου.....	84
Εικόνα 4-30 : Εικόνες θραυσιγενούς επιφάνειας (α) του αρχικού δείγματος και (β) του συγκολλημένου δείγματος. Οι εικόνες ελήφθησαν από το στερεοσκόπιο.....	85
Εικόνα 4-31 : Εικόνες θραυσιγενούς επιφάνειας του αρχικού δείγματος δείγματος. Οι εικόνες ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	86

Εικόνα 4-32 : Εικόνες θραυστιγενούς επιφάνειας του συγκολλημένου δείγματος. Οι εικόνες ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	86
Εικόνα 5-1: Συσχέτιση των τιμών των παραμενουσών τάσεων με τη μορφή, την ένταση και την κατανομή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.....	89
Εικόνα 5-2: Συσχέτιση των τιμών των παραμενουσών τάσεων με τον παράγοντα ανισοτροπίας.....	90
Εικόνα 5-3: Συσχέτιση των τιμών των παραμενουσών τάσεων με τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα.....	91

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με το SAE/AISI σύστημα.....	31
Πίνακας 2-2: Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες κάποιων ανθρακούχων χαλύβων.	33
Πίνακας 2-3: Επίδραση κραματικών στοιχείων στους χάλυβες.....	34
Πίνακας 3-1: Διαστάσεις του αρχικού δείγματος που παρελήφθη.	36
Πίνακας 3-2: Παράμετροι συγκόλλησης EBW.....	37
Πίνακας 3-3: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν με στόχο το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό.	52
Πίνακας 3-4: Στάδια προετοιμασίας υλικού αναφοράς για το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό.	54
Πίνακας 3-5: Συνθήκες λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.....	55
Πίνακας 3-6: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αναφοράς.....	57
Πίνακας 4-1: Χημική σύσταση του αρχικού υλικού που παρελήφθη.....	80
Πίνακας 4-2: Περι-κρυσταλλικές χημικές μικροαναλύσεις.....	81
Πίνακας 4-3: Ενδοκρυσταλλικές χημικές μικροαναλύσεις.....	82
Πίνακας 4-4: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.....	83
Πίνακας 4-5: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.....	83
Πίνακας 4-6: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.....	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

1.1 Ορισμοί

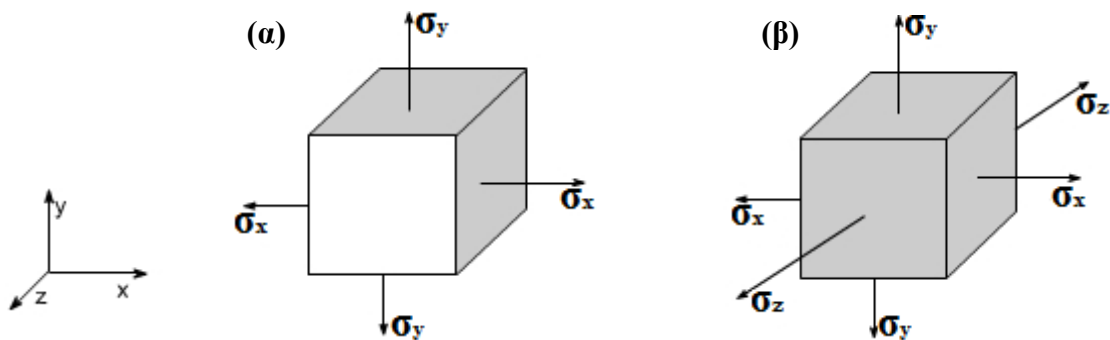
1.1.1 Παραμένουσες τάσεις (residual stresses)

Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως οι τάσεις που αναπτύσσονται εσωτερικά στο υλικό όταν πάψει να επενεργεί πάνω τους οποιαδήποτε ακραία θερμοκρασιακή βάρθρωση και στατική ή δυναμική μηχανική φόρτιση.

Επειδή οι παραμένουσες τάσεις επιδρούν σε ένα σώμα, το οποίο δεν υποβάλλεται σε εξωτερική φόρτιση, η συνισταμένη δύναμη και ροπή τους πρέπει να είναι μηδέν σε οποιαδήποτε διατομή. Αυτό σημαίνει ότι όταν σε μια περιοχή εμφανίζονται εφελκυστικές τάσεις, τότε σε μια άλλη περιοχή της διατομής θα αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις.

1.1.2 Ορθές παραμένουσες τάσεις (normal residual stresses)

Ορθές ονομάζονται οι τάσεις που επιδρούν κάθετα στις έδρες μιας στοιχειώδους επιφάνειας μιας ιδεατής τομής σε ένα υλικό (εικόνα 1-1). Οι ορθές τάσεις περιγράφονται με ένα δείκτη, ο οποίος υποδηλώνει την κατεύθυνση του άξονα στον οποίο επενεργούν οι τάσεις.

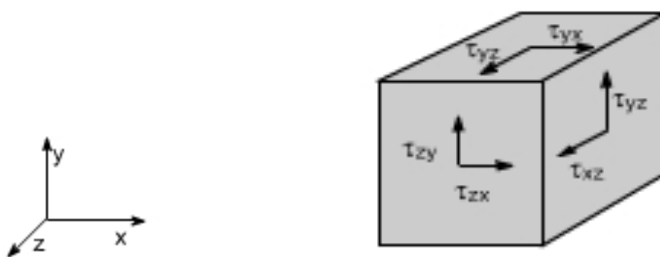


Εικόνα 1-1: Απεικόνιση των ορθών τάσεων στην στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα υλικό (α) σε δύο διαστάσεις και (β) σε τρεις διαστάσεις.

Ως προς το πρόσημο των ορθών τάσεων, ισχύει η σύμβαση ότι οι εφελκυστικές ορθές τάσεις θεωρούνται θετικές και οι θλιπτικές ορθές τάσεις θεωρούνται αρνητικές.

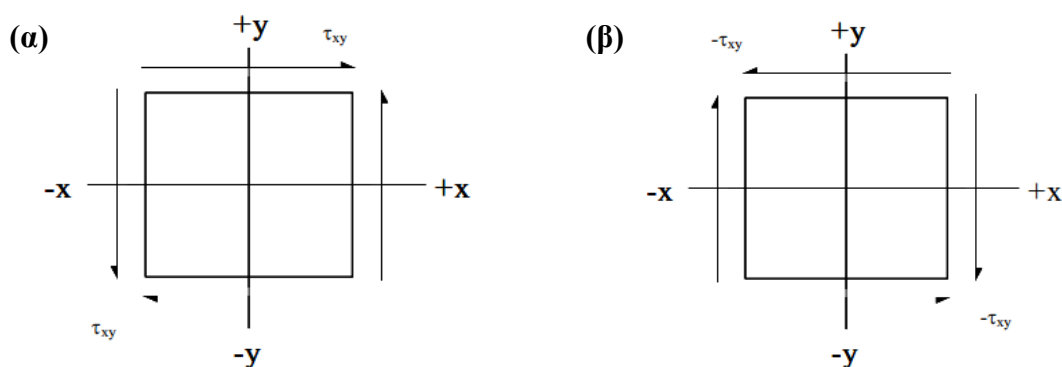
1.1.3 Διατμητικές παραμένουσες τάσεις (shear residual stresses)

Διατμητικές ονομάζονται οι τάσεις που επιδρούν κάθετα στο επίπεδο όπου δρουν αντίστοιχα οι ορθές. Στη γενική περίπτωση, οι διατμητικές τάσεις σχηματίζουν τυχαίες γωνίες με τους άξονες συντεταγμένων, οπότε είναι χρήσιμο κάθε διατμητική τάση να αναλύεται περαιτέρω σε δύο διατμητικές συνιστώσες, με τις διευθύνσεις τους να συμπίπτουν με τους άξονες συντεταγμένων. Οι διατμητικές τάσεις περιγράφονται με δύο δείκτες, εκ των οποίων ο πρώτος δείκτης υποδηλώνει το κάθετο διάνυσμα επιφανείας στην οποία επενεργεί η διατμητική τάση, ενώ ο δεύτερος δείκτης αναφέρεται στην διεύθυνση της διατμητικής τάσης.



Εικόνα 1-2: Απεικόνιση στο χώρο των διατμητικών τάσεων στην στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα υλικό σε τρεις διαστάσεις.

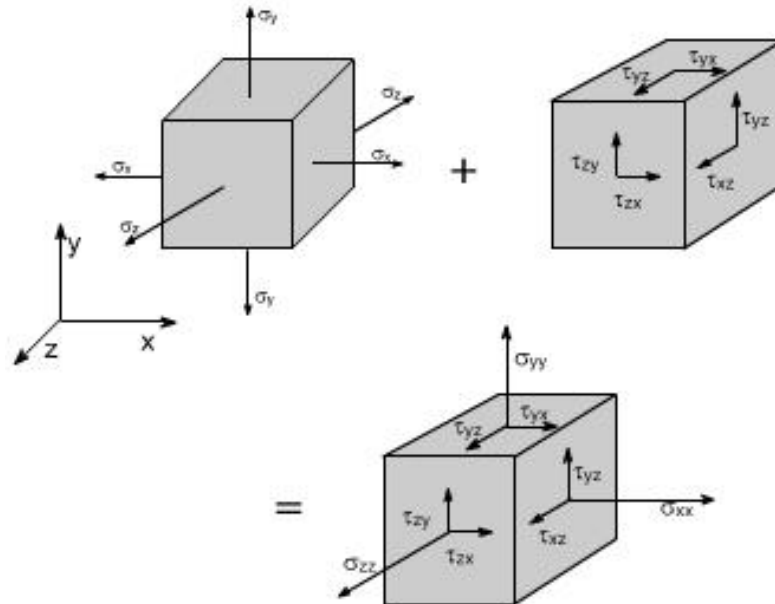
Μία διατμητική τάση θεωρείται θετική εάν η φορά της είναι προς την θετική διεύθυνση του αντίστοιχου άξονα και ταυτόχρονα επενεργεί επάνω στην θετική έδρα της στοιχειώδους επιφάνειας ή εάν η φορά της είναι προς την αρνητική διεύθυνση του αντίστοιχου άξονα και ταυτόχρονα επενεργεί επάνω στην αρνητική έδρα της στοιχειώδους επιφάνειας.



Εικόνα 1-3: (α) Θετικές διατμητικές τάσεις και (β) αρνητικές διατμητικές τάσεις.

1.1.4 Τρισδιάστατη εντατική κατάσταση

Το τασικό πεδίο σε μια στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα στερεό υλικό φαίνεται στην εικόνα 1-4.



Εικόνα 1-4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του τασικού πεδίου στην στοιχειώδη επιφάνεια μιας ιδεατής τομής σε ένα στερεό υλικό.

1.2 Σημασία της ανάλυσης και του προσδιορισμού των παραμένουσων τάσεων

Έχει διαπιστωθεί ότι, τα δομικά μέρη μιας κατασκευής δεν αποτελούνται από υλικά που είναι απαλλαγμένα από παραμένουσες τάσεις. Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού καθώς επίσης και των δομικών μερών μιας κατασκευής (π.χ. αντοχή στην κόπωση, παραμόρφωση, διαστασεολογική σταθερότητα, αντίσταση στη διάβρωση και ψαθυρή θραύση) επηρεάζονται σημαντικά από το ποσοστό των παραμένουσων τάσεων που παρουσιάζουν. Η επίδραση αυτή έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές τη δαπανηρή αντικατάσταση ή επιδιόρθωση των τμημάτων μιας κατασκευής που χρήζουν επισκευής λόγω της απομείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων τους, η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού από την συνδυασμένη δράση παραμενουσών (εσωτερικών) και εξωτερικά επιβαλλόμενων τάσεων.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των δομικών μερών μιας κατασκευής χρειάζεται να πραγματοποιηθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και αξιοπιστία. Η σωστή

διαστασιολόγηση της ίδιας της κατασκευής και η εκτίμηση του τασικού πεδίου της αποτελούν τις κύριες και ταυτόχρονα απαραίτητες προϋποθέσεις σύγχρονου μηχανολογικού σχεδιασμού για την αποτροπή μιας ανεπιθύμητης αστοχίας. Επομένως, η ανάλυση στο στάδιο της σχεδίασης ως προς το επίπεδο των παραμενουσών τάσεων και ο ταυτόχρονος προσδιορισμός τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας είναι καίριας σημασίας, ώστε η τελική κατασκευή να είναι ασφαλής και αξιόπιστη.

Συστηματικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, αποδεικνύουν ότι οι ύπαρξη παραμενουσών τάσεων σε συγκολλημένα δοκίμια, μειώνει δραματικά την αντοχή τους στην κόπωση (fatigue strength) και του χρόνου ζωής τους (fatigue life). Διαπιστώνεται ότι, η μείωση των επιζήμιων εφελκυστικών τάσεων (tensile stresses) στην ρίζα της συγκόλλησης και η ενίσχυση των ευνοϊκότερων θλιπτικών τάσεων (compressive stresses) αυξάνουν την αντοχή και κατ' επέκταση τη διάρκεια ζωής ενός συγκολλημένου υλικού.

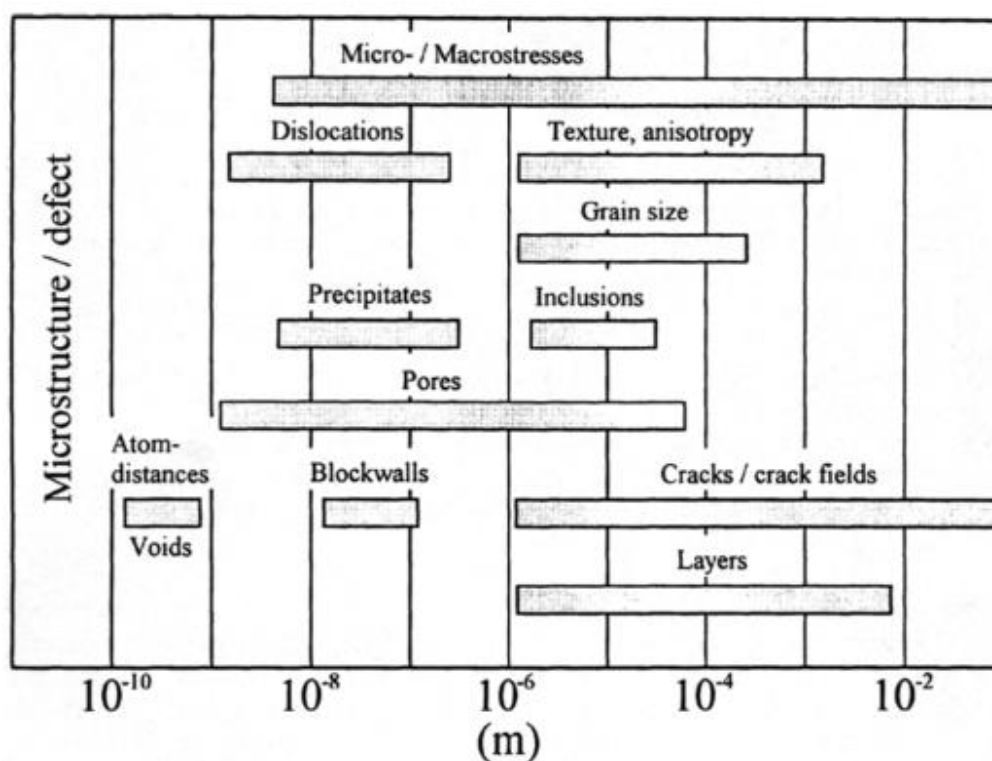
Οι παραμενουσες τάσεις θα πρέπει να κατανέμονται στα εκάστοτε δομικά μέρη μιας κατασκευής, με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντισταθμίζονται και να αλληλοαναιρούνται. Η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων με το επιθυμητό πρόσημο και μέγεθος μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας παρασκευής του υλικού και των παραμέτρων κατασκευής. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι, ο αξιόπιστος προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων αυξάνει την απόδοση της κατασκευής και τη διάρκεια ζωής της.

Ωστόσο, οι παραμενουσες τάσεις προσδιορίζονται δυσκολότερα, συγκριτικά με τις τάσεις που εισάγονται σε συνθήκες της δυναμικής στατικής λειτουργίας. Κατά συνέπεια, έχει μεγάλη πρακτική σημασία η ύπαρξη αξιόπιστων μεθόδων μέτρησης των παραμενουσών τάσεων, οι οποίες επιπλέον να μπορούν να παρέχουν έγκυρες πληροφορίες. Αν και έχει συντελεστεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη τεχνικών, που έχουν ως στόχο, την περιγραφή του τασικού πεδίου, χρειάζεται να καταβληθεί ακόμα σημαντική προσπάθεια στην βελτιστοποίηση των υπάρχουσων μεθόδων ή την αναζήτηση νέων μεθόδων για τον προσδιορισμό και την ανάλυση των παραμενουσών τάσεων.

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί την ανάπτυξη νέων προηγμένων υλικών έχει με τη σειρά της δημιουργήσει νέες προκλήσεις στην ανάλυση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη πολυφασικών υλικών με βελτιστοποιημένες ιδιότητες, σύνθετων υλικών με λεπτά υποστρώματα, προηγμένων κεραμικών και πολυμερών οδήγησε στην εξέλιξη των τεχνικών μέτρησης και των μεθόδων αξιολόγησης της εντατικής τους κατάστασης και της διαμόρφωσης του τασικού τους πεδίου, ειδικά όταν τα προαναφερόμενα υλικά υποβάλλονταν σε διάφορες επιφανειακές μηχανικές

διεργασίες. Ωστόσο, αν και τα πειραματικά αποτελέσματα, για τον προσδιορισμό της διαβάθμισης των μακρο- και μικρο- τάσεων, επιβεβαιώνονται από τις θεωρητικές μελέτες, είναι επιβεβλημένη η ανάγκη επίτευξης μεγαλύτερης προόδου στον τομέα αυτό.

Σε πολλές εγκαταστάσεις παραγωγής πρώτων υλών αλλά και κατασκευαστικές εταιρίες, ο προσδιορισμός των παραμένουσων τάσεων είναι συνυφασμένος με τον ποιοτικό έλεγχο. Στις περιπτώσεις αυτές έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η in-situ επόπτευση της προέλευσης, κατανομής, αύξησης ή μείωσης του μεγέθους των παραμενουσών τάσεων σε διάφορα εξαρτήματα με κυμαινόμενο σχήμα και μέγεθος. Το εύρος του τασικού πεδίου σε σύγκριση με τις διαστάσεις διαφόρων μικροδομικών ελαττωμάτων παρουσιάζεται στην εικόνα 1-5.

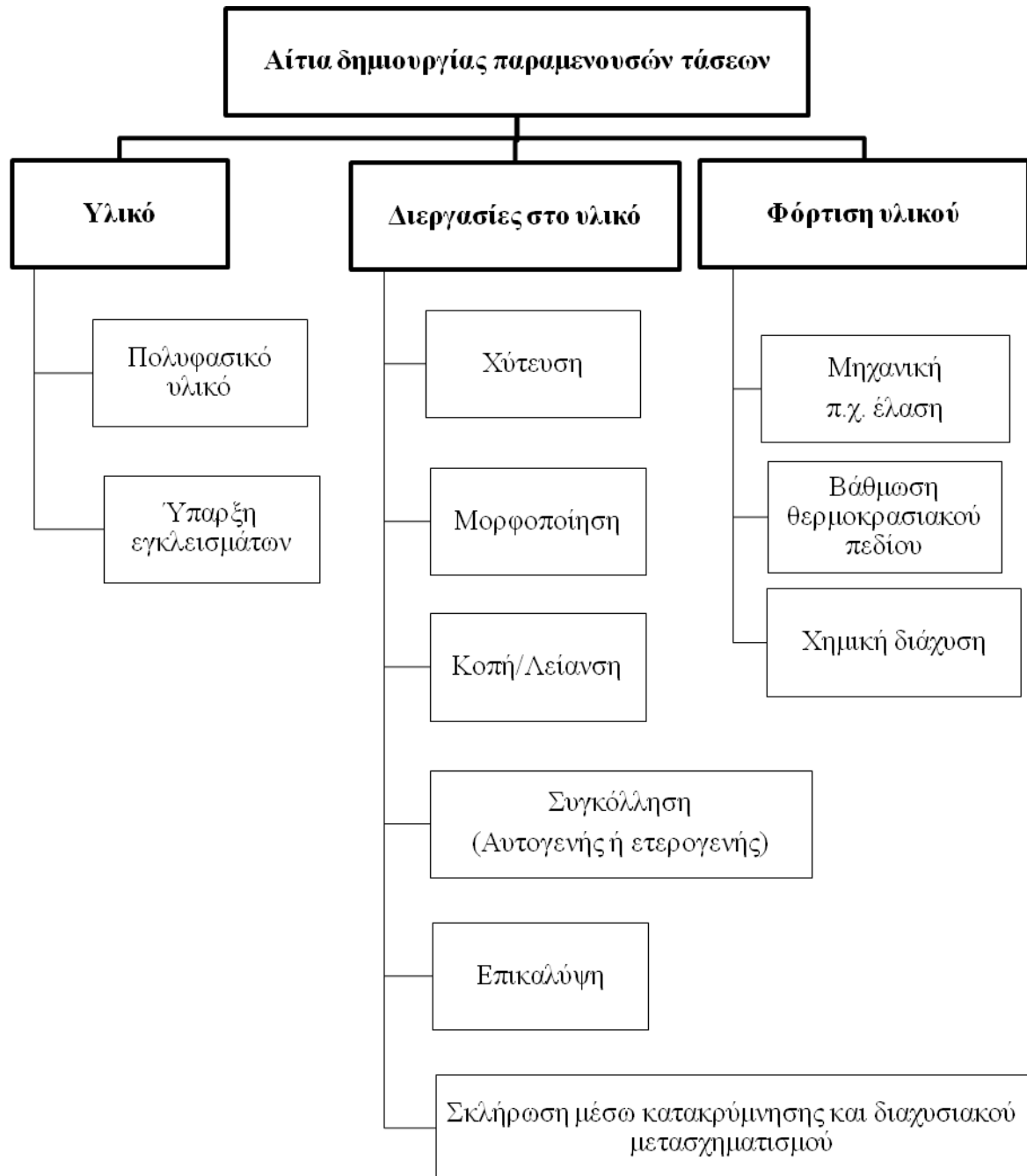


Εικόνα 1-5: Εύρος τασικού πεδίου σε σύγκριση με τις διαστάσεις των μικροδομικών ατελειών. [1]

1.3 Προέλευση των παραμενουσών τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας εξαιτίας της παραμόρφωσης που συντελείται στο υλικό, της θερμικής κατεργασίας που υφίσταται, καθώς και διαφόρων διαδικασιών που σχετίζονται με την αλλαγή στο σχήμα και τις ιδιότητες του υλικού. Σε γενικές γραμμές, οι παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται σε περιοχές του υλικού, όπου παρατηρείται ασυνέχεια του τασικού πεδίου ως συνέπεια της βάρθρωσης της πλαστικής ροής (εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού) ή/και

των θερμοκρασιών (εξαιτίας είτε των θερμικών κατεργασιών είτε κυρίων των ρυθμών απόψυξης). Επίσης οι μετασχηματισμοί φάσεων που συντελούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας με αποτέλεσμα την παρουσία παραμενουσών τάσεων στο υλικό οδηγούν στην αλλαγή της κατανομής των ατόμων στην μοναδιαία κυψελίδα (εικόνα 1-6).



Εικόνα 1-6: Προέλευση παραμενουσών τάσεων [1-2].

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων, έχει άλλοτε επιζήμιες και άλλοτε ευνοϊκές συνέπειες - επιδράσεις στη συμπεριφορά των δομικών μερών μιας κατασκευής. Επιζήμιες, μπορούν να αποδειχθούν οι παραμένουσες τάσεις όταν μειώνουν

την αντοχή και κατ' επέκταση τη διάρκεια ζωής ενός υλικού, που υπόκειται σε δυναμική καταπόνηση μέσω της επιβολής εξωτερικά εφαρμοζόμενου φορτίου. Για παράδειγμα, η παρουσία εφελκυστικών τάσεων σε μια κατασκευή αποτελεί συχνά τον κύριο λόγο αστοχίας κατά την κόπωση. Διεργασίες, κατά τις οποίες δημιουργούνται θλιπτικές παραμένουσες τάσεις είναι οι συγκολλήσεις (weldings), η λείανση (grinding), η μορφοποίηση (machinery) και η μορφοποίηση σε ράβδο ή σύρμα (rod or wire drawing).

Ευνοϊκές, μπορούν να χαρακτηριστούν οι παραμένουσες τάσεις όταν αξιοποιούνται για την σχεδίαση υλικών που υπόκεινται σε επιφανειακές μηχανικές ή θερμομηχανικές διεργασίες και χαρακτηρίζονται από βελτιωμένες ιδιότητες και αύξηση της μηχανικής αντοχής σε κόπωση. Για παράδειγμα, η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων στο εσωτερικό ενός υλικού, προλαμβάνει τη δημιουργία ρωγμών καθώς επίσης και την έναρξη διάδοσής τους, ενισχύοντας παράλληλα τις αντιτριβικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες του υλικού. Επίσης η αντοχή των ψαθυρών υλικών (π.χ. θερμοσκληρυνόμενο γυαλί) σε στατική φόρτιση βελτιώνεται σημαντικά με την εισαγωγή τάσεων. Για παράδειγμα, στο γυαλί, η ταχεία ψύξη από μεγάλες θερμοκρασίες, οδηγεί στη δημιουργία θλιπτικών επιφανειακών τάσεων οι οποίες εξισορροπούνται από τις ήδη υπάρχουσες εφελκυστικές τάσεις στο εσωτερικό του υλικού, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του σε εφελκυστικά φορτία.

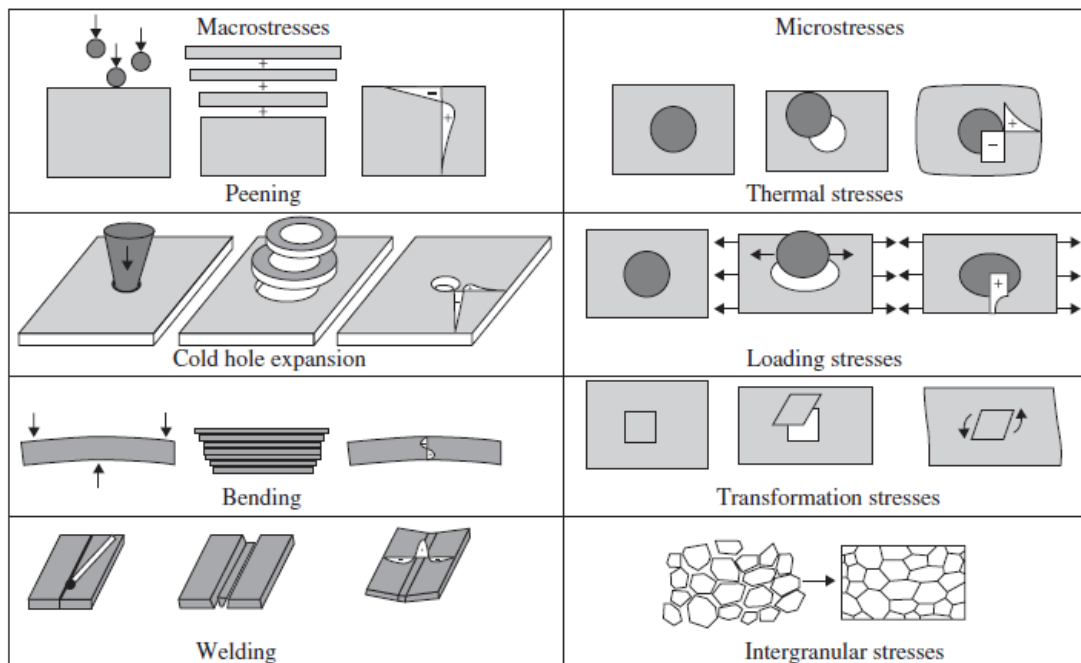
Γενικά, σε υλικά που έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση, το αλγεβρικό άθροισμα των εξωτερικά εφαρμοζόμενων τάσεων με τις παραμένουσες τάσεις οδηγεί στην προσέγγιση του ορίου διαρροής με ταχύτερο ή βραδύτερο ρυθμό. Σε αυτή την περίπτωση, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να επιταχύνουν ή να καθυστερήσουν την εκδήλωση της πλαστικής παραμόρφωσης. Η διανυσματική φύση των τάσεων (ειδικότερα μάλιστα στις συγκολλήσεις) δρα επιβληθτικά στην παρεμπόδιση δημιουργίας και ανάκληση διάδοσης ρωγμών.

1.4 Κατάταξη των παραμενουσών τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

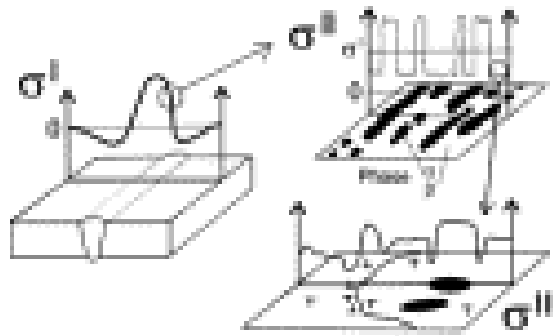
- 1) Ανάλογα με το αίτιο που τις προκαλεί (εικόνα 1-7).
 - Θερμικές (χρονικές) παραμένουσες τάσεις, οι οποίες προξενούν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις.
 - Μόνιμες παραμένουσες τάσεις, δημιουργούμενες από το αποτέλεσμα των πλαστικών παραμορφώσεων σε σώμα που χαρακτηρίζεται ως ελαστοπλαστικό.

- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις, οι οποίες δημιουργούνται κατά την ανομοιόμορφη θέρμανση και ψύξη του σώματος.
- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις, οι οποίες γεννώνται λόγω μετασχηματισμών φάσεων.



Εικόνα 1-7: Παραδείγματα διαφόρων τρόπων με τους οποίους μπορούν να δημιουργηθούν παραμένουσες τάσεις σε ένα υλικό. [3]

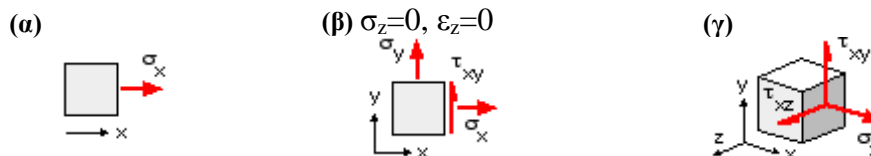
- 2) Ανάλογα με τις διαστάσεις του όγκου της μάζας του σώματος, στην οποία αυτές εξισορροπούνται (εικόνα 1-8).
- Παραμένουσες τάσεις τύπου I (σ^I) ή μακρο-παραμένουσες τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται σε κλίμακα μεγαλύτερη από το μέγεθος του κόκκου του υλικού.
 - Παραμένουσες τάσεις τύπου II (σ^{II}), οι οποίες αποτελούν μικρο-παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται εντός του κάθε κόκκου.
 - Παραμένουσες τάσεις τύπου III (σ^{III}), οι οποίες αποτελούν μικρο-παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται εντός των κρυσταλλικών πλεγμάτων του κόκκου ως αποτέλεσμα της παρουσίας διαταραχών και άλλων κρυσταλλικών ελαττωμάτων.



Εικόνα 1-8: Είδη παραμενουσών τάσεων ως προς την κλίμακα στην οποία αναπτύσσονται. [4]

3) Ανάλογα με την θέση – διάταξή τους στον χώρο (εικόνα 1-9).

- Μονοαξονικές παραμένουσες τάσεις (uniaxial residual stresses), όταν αυτές αναπτύσσονται κατά μία διεύθυνση (αμελητέες στις υπόλοιπες δύο).
- Διαξονικές παραμένουσες τάσεις (biaxial residual stresses), όταν αυτές αναπτύσσονται σε δύο διευθύνσεις (αμελητέες κατά την τρίτη).
- Τριαξονικές παραμένουσες τάσεις (triaxial residual stresses), όταν αυτές αναπτύσσονται και στις τρεις διευθύνσεις.



Εικόνα 1-9: Κατάταξη παραμενουσών τάσεων ανάλογα με τη διάταξή τους στο χώρο (α) μονοαξονική (1-D), (β) διαξονική (2-D) και (γ) τριαξονική (3-D) παραμένουσα τάση.

1.5 Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις

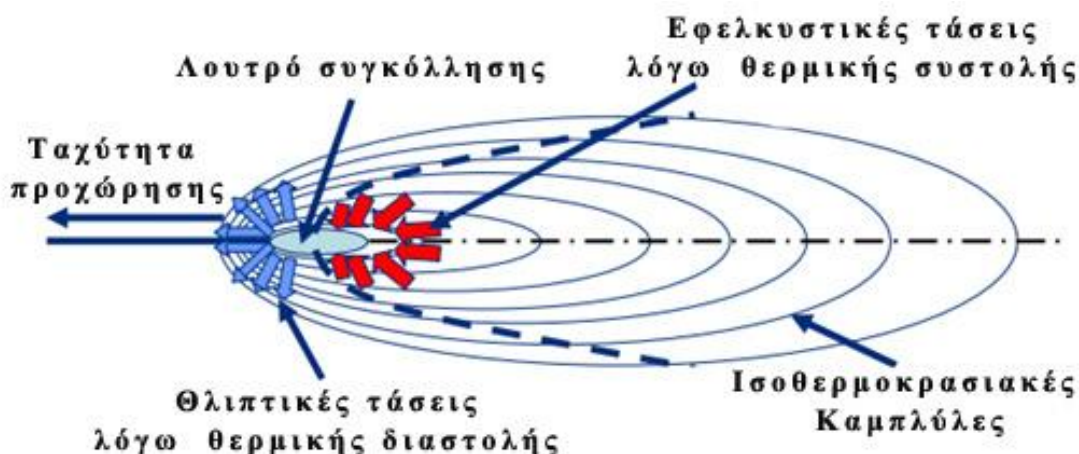
Οι συγκολλήσεις είναι μια διεργασία ζωτικής σημασίας στην βιομηχανία, κατά την οποία δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις, διακυμαινόμενης έντασης και πλάτους. Κατά την διαδικασία της συγκόλλησης, το μέταλλο θερμαίνεται τοπικά και στη συνέχεια στερεοποιείται και ψύχεται έως τη θερμοκρασία δωματίου.

Κατά την απόψυξη του συγκολλημένου μετάλλου, η ζώνη τήξης συστέλλεται. Η συστολή αυτή παρεμποδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης μεταβολής των διαστάσεων της ζώνης τήξης εμφανίζεται σαν ελαστική παραμόρφωση (στα επίπεδα του ορίου διαρροής), η οποία οδηγεί τελικά στην εμφάνιση παραμενουσών τάσεων (εικόνα 1-10). Οι εμφανιζόμενες παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης εξισορροπούνται από αντιδρώσες τάσεις αντίθετου προσήμου στην περιοχή του βασικού μετάλλου. Ο περιορισμός της ελευθερίας των

παραμορφώσεων προξενεί την εμφάνιση τάσεων, οι οποίες βρίσκονται από τον ακόλουθο τύπο:

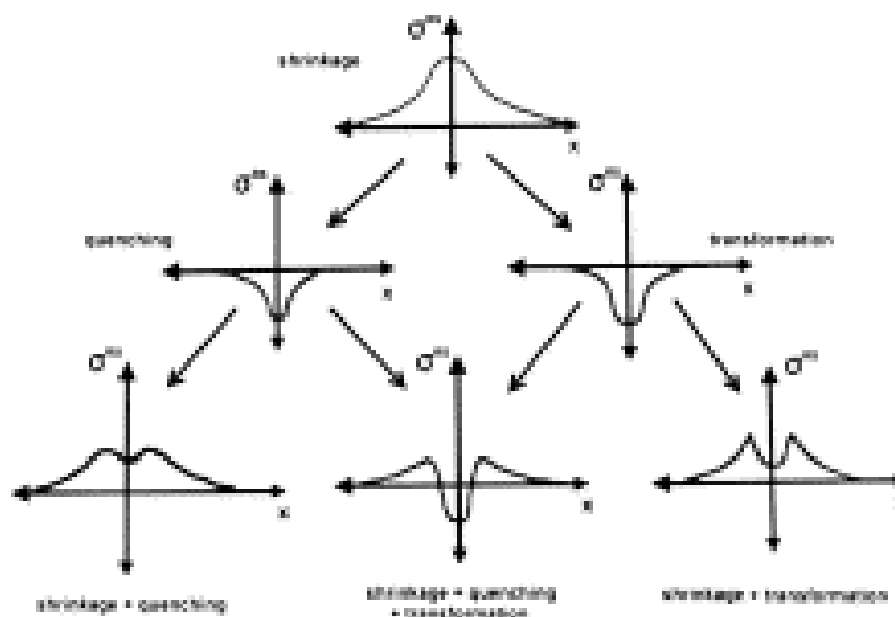
$$\sigma = E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t \quad (1)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, α_t είναι γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής και Δt είναι διαφορά θερμοκρασίας της θερμαινόμενης και της μη-θερμαινόμενης ζώνης του μετάλλου.



Εικόνα 1-10: Εμφάνιση παραμένουσων τάσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Είναι γεγονός ότι, η υψηλή θερμική παροχή στο συγκολλημένο μέταλλο οδηγεί στην ανομοιόμορφη κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου (non-uniform heat distribution), σε μετασχηματισμούς φάσεων και στην πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Αυτές οι αλλαγές δημιουργούν ένα ετερογενές μοτίβο ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων στη ζώνη τήξης και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Κάθε τάση ενεργοποιεί μηχανισμούς που επενεργούν με τη σειρά τους στη διαμόρφωση της κατανομής τους (εικόνα 1-11). Οι παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται εξαιτίας της συστολής που λαμβάνει χώρα κατά την απόψυξη του τηκόμενου συγκολλημένου μετάλλου είναι συνήθως εφελκυστικές. Οι μετασχηματισμοί φάσεων εισάγουν παραμένουσες τάσεις στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη καθώς στην περιοχή αυτή η θερμοκρασία υπερβαίνει το κρίσιμο όριο για την έναρξη μετασχηματισμών. Όταν η επίδραση των μετασχηματισμών φάσεων είναι κυρίαρχη σε μια ζώνη, δημιουργούνται θλιπτικές τάσεις.



Εικόνα 1-11: Κατανομή των παραμενουσών τάσεων λόγω της επίδρασης διαφόρων μεταλλουργικών διαδικασιών κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. [5]

1.6 Μέθοδοι μέτρησης των παραμένουσων τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις, ως διανυσματικό μέγεθος υπερτίθενται των τάσεων που εισάγονται στο υλικό εξαιτίας της λειτουργίας του και για το λόγο αυτό είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν.

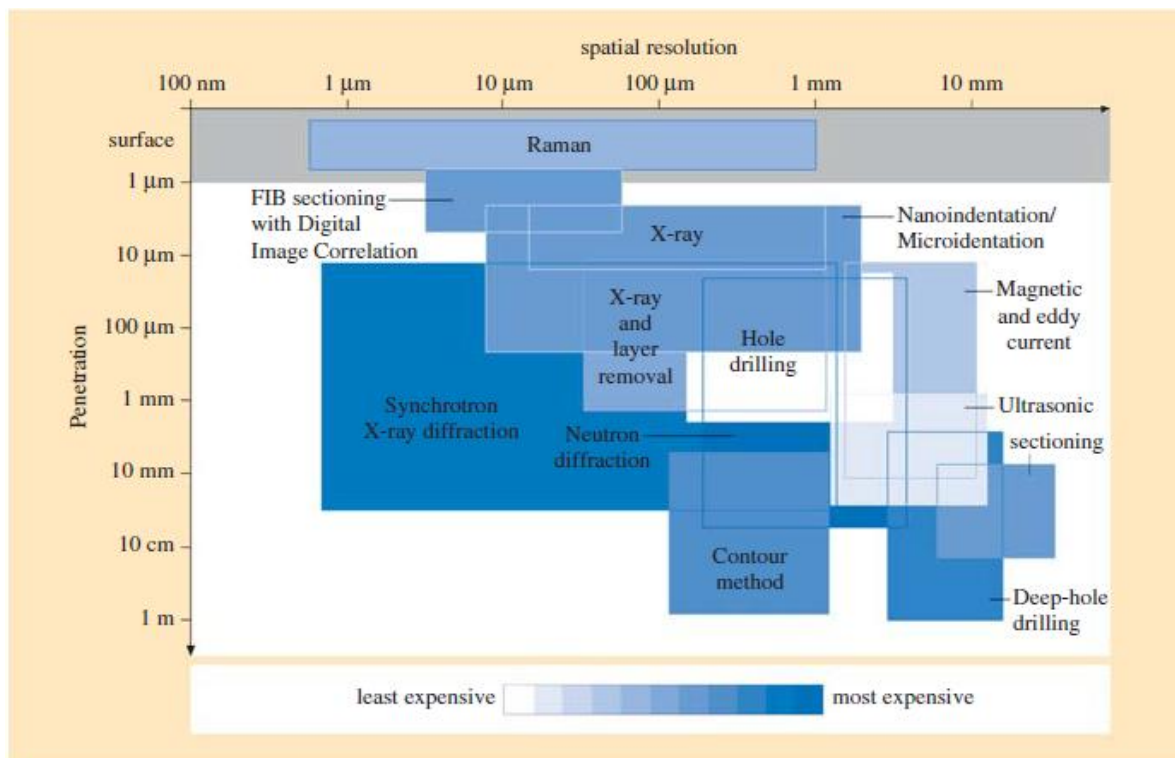
Οι μέθοδοι μέτρησης (Εικόνα 1-12) των παραμενουσών τάσεων αρχικά διαχωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

1. Οι μηχανικές μέθοδοι μέτρησης των τάσεων. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στον έλεγχο και επόπτευση των αλλαγών στην παραμόρφωση των υπό έλεγχο εξαρτημάτων, είτε κατά την γένεση των παραμενουσών τάσεων, είτε κατόπιν αυτής με την σκόπιμη αφαίρεση τμήματος υλικού επιτρέποντας στις τάσεις να εκτονωθούν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μηχανικών μεθόδων μέτρησης των παραμένουσων τάσεων είναι η μέθοδος διάνοιξης οπής (holl-drill method), η μέθοδος της ενδοτηκότητας (compliance method), κ.α.
2. Οι μέθοδοι μέτρησης με διάθλαση. Στις μεθόδους αυτές χρησιμοποιείται η πρόσπτωση ακτίνας γνωστού μήκους κύματος στο υπό εξέταση υλικό η οποία μέσω της γωνίας διάθλασης και της αλληλεπίδρασης με τυχόν αλλαγές στο εσωτερικό του υλικού μπορεί να «εντοπίσει» ελαστική παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή με χρήση κατάλληλης τιμής σκληρότητας μπορεί να μετατραπεί σε τάση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεθόδων μέτρησης με

διάθλαση είναι η περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD), περιθλασιμετρία νετρονίων (neutron diffraction), κ.α.

3. Άλλες μέθοδοι. Στις μεθόδους αυτές περιλαμβάνονται μαγνητικές και ηλεκτρικές τεχνικές, υπερηχητικές μέθοδοι κ.ά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μαγνητικής μεθόδου προσδιορισμού των παραμένουσων τάσεων είναι ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen.

Στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά (επισκόπηση) των μεθόδων που εντάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες. Ωστόσο, εκτενέστερη παρουσίαση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι παραμένουσες τάσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί στο πειραματικό μέρος.

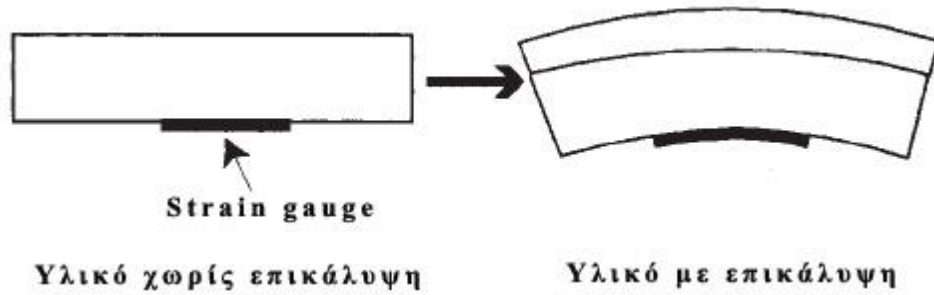


Εικόνα 1-12: Μέθοδοι μέτρησης των παραμένουσων τάσεων. [6]

1.6.1 Μηχανικές μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων

1.6.1.1 Μέτρηση μέσω καμπυλότητας (curvature)

Η μέτρηση μέσω καμπυλότητας χρησιμοποιείται συχνά στον καθορισμό των τάσεων εντός επικαλύψεων και υποστρωμάτων (λεπτών στρωμάτων). Η απόθεση ενός στρώματος μπορεί να εισάγει τάσεις οι οποίες προκαλούν καμπύλωση στο υπόστρωμα (εικόνα 1-13).

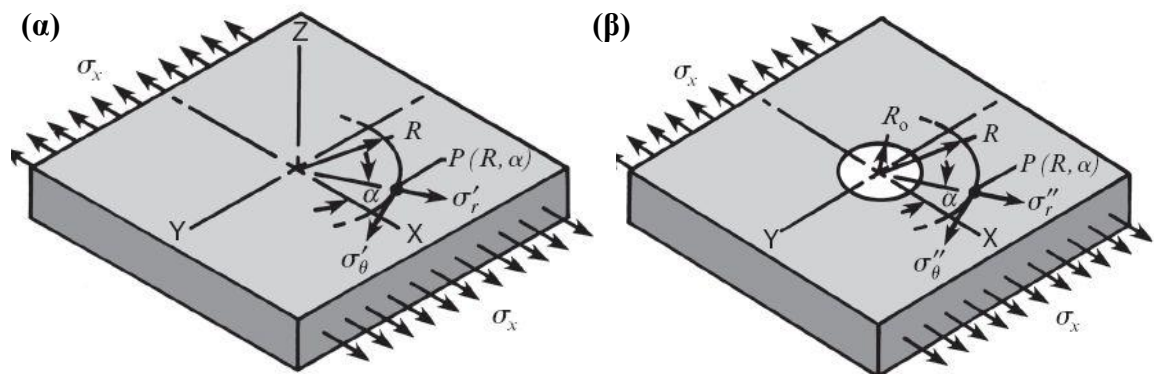


Εικόνα 1-13: Μέτρηση παραμενουσών τάσεων μέσω καμπυλότητας.

Οι προκαλούμενες αλλαγές στην καμπύλωση κατά την εναπόθεση της επικάλυψης, επιτρέπει τον υπολογισμό των τιμών των παραμενουσων τάσεων ως συνάρτηση του πάχους του στρώματος της επικάλυψης. Ο υπολογισμός της καμπύλωσης πραγματοποιείται είτε με μεθόδους επαφής (π.χ. επιμηκυσιόμετρα) είτε χωρίς απευθείας επαφή (π.χ. βιντεοσκόπηση, laser scanning). Η μέτρηση περιορίζεται συνήθως σε πολύ λεπτά στρώματα για την αποφυγή πολυαξονικής καμπύλωσης.

1.6.1.2 Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπής (hole drilling)

Η δημιουργία οπής (ακόμη και πολύ μικρής διαμέτρου) σε ένα υλικό που περιέχει παραμενουσες τάσεις, προκαλεί την τοπική χαλάρωση των τάσεων. Η βασική αρχή μέτρησης, στηρίζεται στο ότι οποιοδήποτε διάνυσμα που είναι κάθετο σε μία ελεύθερη επιφάνεια (στην προκειμένη περίπτωση οπή) είναι απαραίτητα ένας διευθύνων άξονας στον οποίο οι κάθετες τάσεις είναι μηδενικές. Η εξάλειψη αυτών των τάσεων στην επιφάνεια της οπής διαφοροποιεί τις τάσεις στη γύρω περιοχή, προκαλώντας αλλαγή των τοπικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια του υλικού.



Εικόνα 1-14: Εντατική κατάσταση (α) πριν και (β) μετά τη διάνοιξη την οπής.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές της μεθόδου αυτής, η οπή που διανοίγεται έχει βάθος το οποίο είναι περίπου ίσο με την διάμετρο της ανοιγόμενης οπής και σχετίζεται με το πάχος του αντικειμένου.

Δυστυχώς, η γεωμετρία της οπής είναι αρκετά πολύπλοκη και δεν υπάρχει γρήγορος τρόπος, μέσω της θεωρίας της ελαστικότητας, για τον απευθείας υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων από τις μετρήσιμες παραμορφώσεις.

1.6.1.3 Μέτρηση μέσω ενδοτικότητας (compliance method)

Η μέθοδος ενδοτικότητας ρωγμών περιλαμβάνει την διάνοιξη μίας μικρής εγκοπής για την επόπτευση της εκτόνωσης των τάσεων στην περιοχή πλησίον της εγκοπής με χρήση συμβολομετρίας επιμηκυνσιόμετρου. Με την ρύθμιση (αυξομείωση) του βάθους της εγκοπής είναι δυνατή η ανάλυση του τασικού πεδίου, ως συνάρτηση του βάθους για σχετικά απλές κατανομές τάσεων.

1.6.2 Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων με διάθλαση

Στην γενική περίπτωση η συνθήκη διάθλασης, η οποία αποτελεί και την αρχή λειτουργίας των μεθόδων μέτρησης παραμενουσών τάσεων με διάθλαση, εκφράζεται από τον νόμο του Bragg:

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin \theta \quad (2)$$

όπου λ : είναι το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης ακτινοβολίας, θ είναι η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας (ή ανακλώμενης) δέσμης και της επιφάνειας των επιπέδων ανάκλασης, d είναι η απόσταση μεταξύ των επιπέδων ανάκλασης, και n είναι η τάξη ανάκλασης ($n=1, 2, 3 \dots$).

1.6.2.1 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam diffraction)

Η δέσμη ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται για την εξέταση πολύ λεπτών αντικειμένων (πάχος κάτω από 100nm) και μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλή εγκάρσια χωρική ανάλυση (έως και τα όρια των κόκκων). Επειδή η μέθοδος εξετάζει πολύ λεπτά αντικείμενα, τα αποτελέσματα που δίνει είναι ευαίσθητα σε φαινόμενα που προκαλούνται από την επιφανειακή ανακούφιση των τάσεων. Παρόλαυτά, η μέθοδος παρέχει έναν τρόπο μέτρησης επιφανειακών τάσεων τόσο τύπου I όσο και τύπου II, καθώς και «μάκρο»-εσωτερικών τάσεων σε πολύ μικρά εξαρτήματα ηλεκτρονικών συσκευών.

1.6.2.2 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ακτίνων X (X-ray diffraction)

Η τεχνική μέτρησης παραμενουσών τάσεων με ακτίνες X, ειδικότερα των τάσεων που προκαλούν παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής των υλικών, είναι δυνατή εξαιτίας του μήκους κύματος των ακτίνων X (μήκη κύματος μεταξύ 0.1 και 0.2 nm). Η ενδοατομική απόσταση των μεταλλικών κρυστάλλων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος των ακτίνων X. Αυτό καθιστά δυνατή την διείσδυση των ακτίνων στο κρυσταλλικό πλέγμα και την ανάκλασή από τα πλεγματικά επίπεδα.

1.6.2.3 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης νετρονίων (neutron beam diffraction)

Όπως και οι άλλες τεχνικές διάθλασης, η διάθλαση ακτίνας νετρονίων βασίζεται στις ελαστικές παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος ενός πολυκρυσταλλικού υλικού. Η δέσμη νετρονίων μας παρέχει το πλεονέκτημα ότι τα μήκη κύματος είναι συγκρίσιμα με την ενδοατομική απόσταση και η διείσδυσή τους μέσα στα υλικά, τυπικά, έχει πάχος αρκετών εκατοστών. Έτσι, περιορίζοντας την περιοχή και το πεδίο δράσης της δέσμης με την βοήθεια ειδικών σχισμών ή συσκευών εστίασης, είναι δυνατόν να πάρουμε διαθλασμένη ένταση, η οποία να προέρχεται από έναν πολύ μικρό όγκο (κάτω από 1 mm) που βρίσκεται βαθιά μέσα στο υπό εξέταση δείγμα. Παρόλα αυτά, σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, όπως την διάθλαση των ακτίνων X, το κόστος είναι πολύ υψηλότερο και η διαθεσιμότητα είναι πολύ μικρότερη. Προς το παρόν η κύρια χρήση της μεθόδου εντοπίζεται κυρίως σε ερευνητικά κέντρα.

1.6.2.4 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης «σκληρών» ακτίνων X (hard X-ray diffraction)

Οι πηγές των «σκληρών» ακτίνων X μπορεί να είναι έως και ένα εκατομμύριο φορές πιο έντονες από τις συμβατικές πηγές και παρέχουν φωτόνια υψηλής ενέργειας και είναι αρκετές χιλιάδες φορές πιο διεισδυτικές σε σχέση με τις συμβατικές ακτίνες X. Αυτό σημαίνει ότι η διάθλαση των «σκληρών» ακτίνων X είναι ικανή να παρέχει πολύ μεγάλη ανάλυση στην τρισδιάστατη κατανομή των παραμορφώσεων σε βάθη κάποιων χιλιοστών.

1.6.3 Άλλες μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων

1.6.3.1 Μαγνητικές και ηλεκτρικές τεχνικές

Για την μέτρηση παραμενουσών τάσεων έχουν χρησιμοποιηθεί μαγνητικές ιδιότητες. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι αποτελούν μη καταστροφικές, φθηνές και αξιόπιστες μεθόδους. Ο χάλυβας, που εμφανίζει σιδηρομαγνητική συμπεριφορά είναι ευαίσθητος στις εσωτερικές τάσεις, λόγω του μαγνητοελαστικού φαινομένου. Με την ελάχιστη ενέργεια, το μαγνητικό δίπολο θα ευθυγραμμιστεί με τις κρυσταλλικές διευθύνσεις (μαγνητικοί άξονες). Μία αλλαγή στο μέτρο των τάσεων θα έχει ως συνέπεια την αλλαγή του αριθμού των μαγνητικών διπόλων που ευθυγραμμίζονται με κάθε άξονα και συνεπώς τη μείωση της μαγνητο – ελαστικής ενέργειας. Αυτή η μαγνητική ανισοτροπία που εισήχθη λόγω των τάσεων, οδηγεί στην εκτροπή ενός τεχνητού μαγνητικού πεδίου από την δεδομένη του διεύθυνση. Ένα πηνίο μπορεί να “αντιληφθεί” αυτές τις μεταβολές τόσο στην διεύθυνση των τάσεων, όσο και στο μέγεθός τους.

Ένας άλλος τρόπος «εντοπισμού» τάσεων είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή. Πρόκειται για την εκπομπή ελαστικών κυμάτων προερχόμενων από μεταβολές του τασικού πεδίου λόγω μαγνητοσυστολής.

Οι μαγνητικές μέθοδοι είναι ευαίσθητες σε αρκετούς παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την χρήση των μεθόδων σε πειραματικές διαδικασίες. Παρόλα αυτά, για μαγνητοσυστολικά υλικά, οι μαγνητικές μέθοδοι παρέχουν αξιόπιστες για μη καταστροφικές μέτρησεις των παραμενουσών τάσεων.

1.6.3.2 Υπερηχητικές τεχνικές (ultrasonics)

Όταν σε ένα υλικό εφαρμόζεται μία τάση, τότε μπορούν να παρατηρηθούν αλλαγές στην υπερηχητική ταχύτητα. Οι ακουστοελαστικές μεταβλητές που απαιτούνται για την ανάλυση συνήθως υπολογίζονται μέσω βαθμονόμησης. Διαφορετικά είδη κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μα η πιο κοινή μέθοδος είναι η μέθοδος διαμήκους διαθλώμενου κύματος. Η μεγαλύτερη ευαισθησία επιτυγχάνεται όταν το κύμα διαδίδεται στην ίδια κατεύθυνση με αυτή της τάσης. Η τάση υπολογίζεται από κατάλληλους τύπους συναρτήσεων των χαρακτηριστικών του κύματος.

Η μέθοδος παρέχει την δυνατότητα μέτρησης των «μάκρο»-παραμενουσών τάσεων σε μεγάλα τμήματα όγκου ενός υλικού. Οι ταχύτητες των υπερηχητικών κυμάτων εξαρτώνται από ανομοιογένειες στην μικροδομή των υλικών. Συναντώνται δυσκολίες στο διαχωρισμό

των επιπτώσεων λόγω πολυαξονικών εντατικών καταστάσεων. Παρόλα αυτά, η μέθοδος είναι κατάλληλη για επιθεωρήσεις και μελέτες βιομηχανικής κλίμακας.

1.6.3.3 Θερμοελαστικές μέθοδοι

Η ελαστική παραμόρφωση ενός υλικού προκαλεί μικρές αλλαγές στην θερμοκρασία (1 mK για 1 MPa στους χάλυβες). Είναι δυνατό, χρησιμοποιώντας κατάλληλη κάμερα υπερύθρων, να χαρτογραφηθούν οι αλλαγές θερμοκρασίας δίνοντας μία ενδεικτική εικόνα των διαφοροποιήσεων της τάσης. Η αλλαγή της θερμοκρασίας, στην οποία βασίζεται η μέθοδος είναι αρκετά μικρή συγκρινόμενη με την ευαισθησία των καμερών υπερύθρων και για αυτό η μέθοδος έχει περιορισμένη χρήση επί του παρόντος.

1.6.3.4 Φωτοελαστικές μέθοδοι

Η ταχύτητα του φωτός, καθώς αυτό διέρχεται από διαφανή υλικά, έχει την τάση να διαφοροποιείται ανισότροπα, όταν το υλικό υπόκειται σε τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοελαστικό και αποτελεί τη βάση μίας άλλης μεθόδου για την μέτρηση παραμενουσών τάσεων. Οι τάσεις αυτές αλλοιώνουν το εσωτερικό των υλικών σχηματίζοντας χαρακτηριστικές δομές οι οποίες γίνονται ορατές με την χρήση λευκού ή μονοχρωματικού φωτός (προϋποτίθενται βέβαια η εξέταση υλικών διαμέσω των οποίων μπορεί να διέλθει το φως). Οι δομές αυτές μπορούν να «μεταφραστούν» (μέσω κατάλληλων τύπων) και προσδιορίσουν το τοπικό τασικό πεδίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΕΥΤΗΚΤΟΕΙΔΗΣ ΧΑΛΥΒΑΣ

2.1 Χάλυβες

Οι χάλυβες, όπως είναι γνωστό, συνιστούν κράματα Fe-C, με περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) μικρότερη ή ίση του 1,5% κ.β. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν, σε μικρές ποσότητες, και άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές και τις μηχανικές ιδιότητές τους [7-10].

2.2 Διάκριση χαλύβων

2.2.1 Ως προς τη χημική τους σύσταση

Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

1. Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες και
2. Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες

Με τη σειρά τους, οι κραματωμένοι χάλυβες, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των κραματικών τους στοιχείων διακρίνονται σε:

1. Ελαφρά κραματωμένους,
2. Μέτρια κραματωμένους
3. Ισχυρά κραματωμένους

2.2.2 Ως προς τον προορισμό τους

Ως προς τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

1. Χάλυβες διαμόρφωσης και
2. Χυτοχάλυβες

2.2.3 Ως προς τις εφαρμογές τους

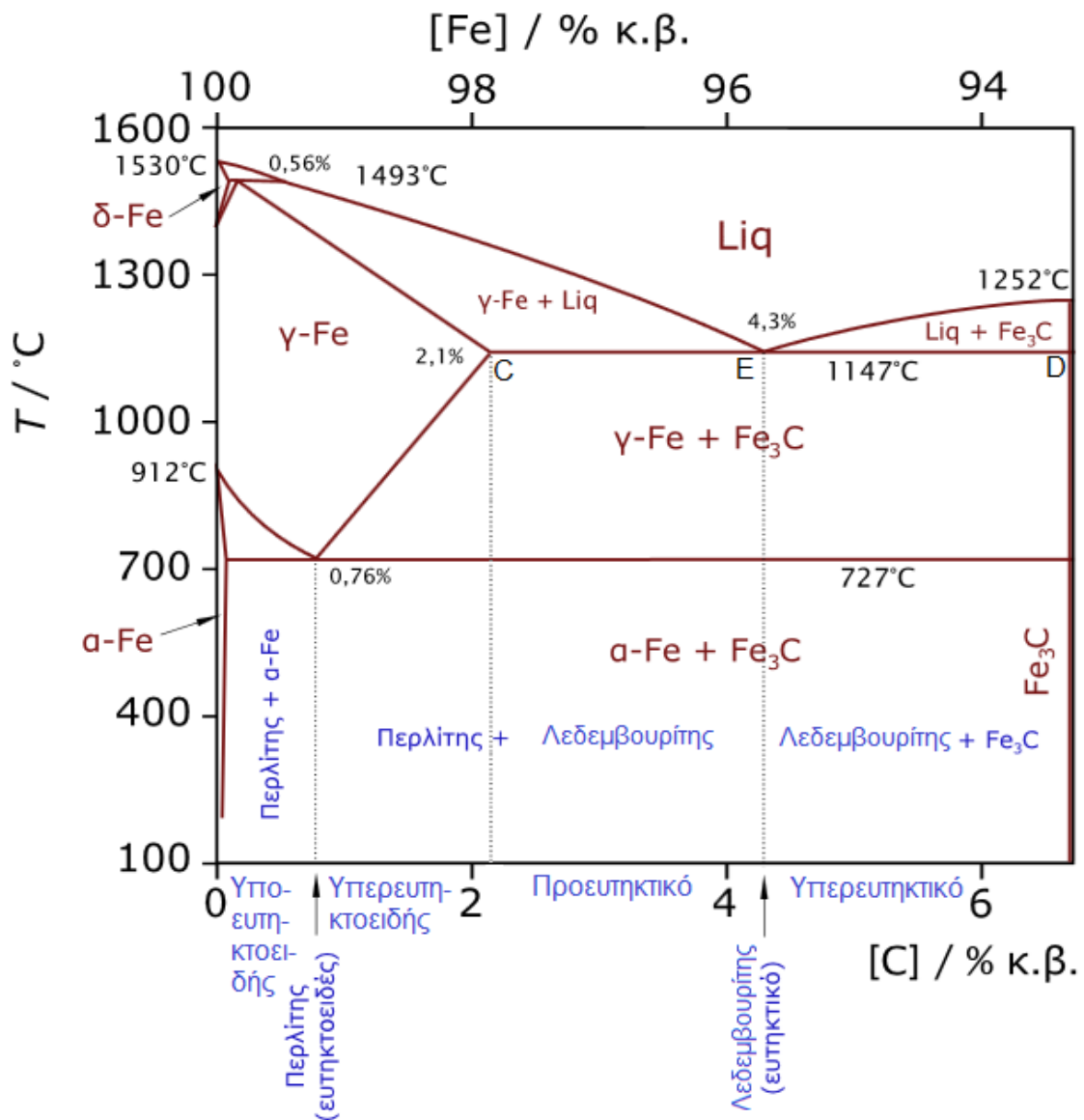
Ως προς τις χρήσεις τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

1. Χάλυβες κατασκευών (υποευτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χάλυβες Ni-Cr-Mo, χρωμιούχοι, χρωμομολυβδαινιούχοι, χρωμοβαναδιούχοι, μαγγανιοπυριτιούχοι, χάλυβες μαρτενγήρανσης ή maraging, αυτόματοι, διφασικοί φερριτομαρτενσιτικοί dual-phase).
2. Εργαλειοχάλυβες (χάλυβες αντοχής σε φθορά από τριβή, καλής δυθραυστότητας, καλής εμβαπτότητας, αντοχής σε επαναφορά)
3. Ανοξείδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες και
4. Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (μαλακοί μαγνήτες, μόνιμοι μαγνήτες, μη μαγνητικοί χάλυβες).

2.2.4 Ως προς την κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (C)

Σύμφωνα με το μετασταθές διάγραμμα φάσεων σιδήρου - άνθρακα (Fe - C), που παρουσιάζεται στην εικόνα 2-1, τα τεχνικά κράματα Fe - C διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε C. Τα κράματα αυτά έχουν μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον και οι κατηγορίες αυτές είναι:

1. Σίδηροι, με ποσοστό άνθρακα 0-0,002%
2. Χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα από 0.02-2%
3. Χυτοσίδηροι, ποσοστό άνθρακα από 2-5%



Εικόνα 2-1: Διμερές διάγραμμα φάσεων Fe-C.

Το διάγραμμα δεν είναι ευσταθές γιατί ο σεμεντίτης (Fe_3C) που σχηματίζεται αποτελεί μια μετασταθή ένωση. Αυτό σημαίνει ότι το διάγραμμα, που απεικονίζεται στην εικόνα 2-

1, δεν αποτελεί ένα διάγραμμα ισορροπίας. Ωστόσο, λόγω του αργού ρυθμού μετασχηματισμού του σεμεντίτη (Fe_3C) στη θερμοκρασία δωματίου, το καρβίδιο του σιδήρου δεν θα μετασχηματιστεί σε σίδηρο και γραφίτη. Αυτός είναι και ο λόγος του το διάγραμμα $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ είναι αυτό που ισχύει πρακτικά [7-10].

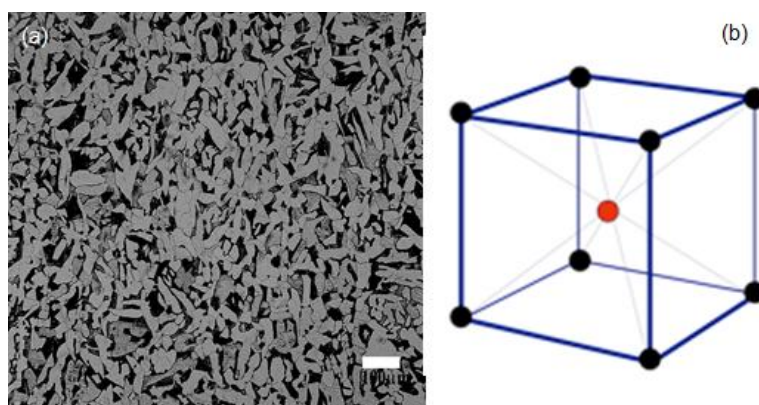
Γίνεται αντιληπτό, ότι ο άνθρακας στους χάλυβες δε βρίσκεται ελεύθερος με τη μορφή γραφίτη, αλλά είτε βρίσκεται στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου, σχηματίζοντας στερεό διάλυμα παρεμβολής, είτε σχηματίζει με το σίδηρο μια χημική ένωση, το καρβίδιο του σιδήρου ή σεμεντίτης (Fe_3C) [7-10].

2.3 Φάσεις και μικροδομικά συστατικά που εμφανίζονται στο διάγραμμα ισορροπίας $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$.

2.3.1 Φερρίτης

2.3.1.1 α -φερρίτης ή α -Fe

Στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα, το οποίο κρυσταλλώνεται στο κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (body-centered cubic, BCC). Επειδή η κυβική ενδοκεντρωμένη δομή είναι λιγότερο πυκνή, η διαλυτότητα του άνθρακα είναι χαμηλή. Η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στην α -φάση του φερρίτη είναι 0,02 % στους 723 °C. Με τη μείωση της θερμοκρασίας, μειώνεται παράλληλα και η διαλυτότητα του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη, φτάνοντας το 0,008 % στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στους 0 °C η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα φτάνει το 0.005 %. Στον καθαρό σίδηρο, ο φερρίτης είναι θερμοδυναμικά σταθερός κάτω από τους 910 °C.



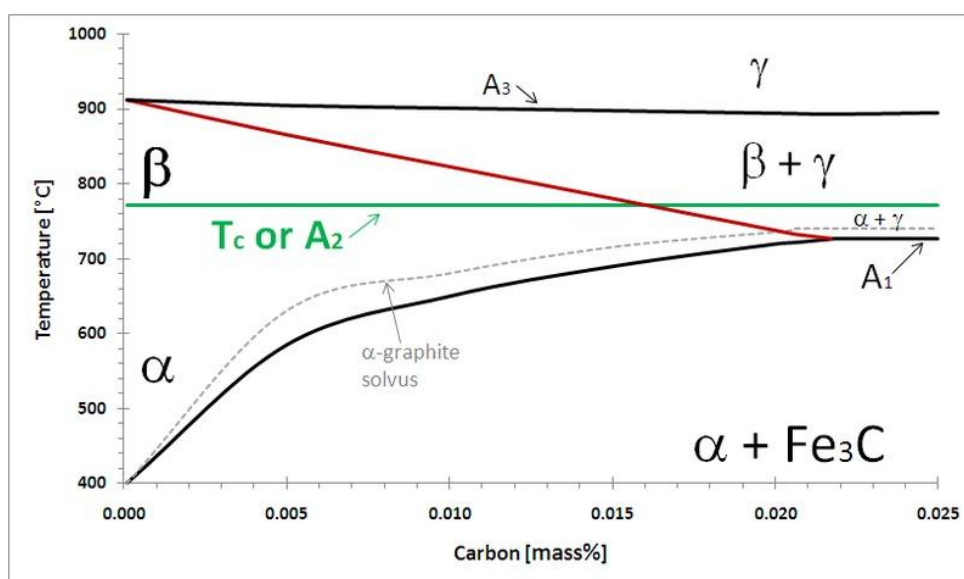
Εικόνα 2-2: (a) Τυπική μικροδομή φερρίτη (ανοιχτόχρωμες περιοχές), (b) κυβικό χωροκεντρωμένο (BCC) κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και το άτομο το άνθρακα παρουσιάζεται ως κόκκινη σφαίρα στο κέντρο του κύβου).

Κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία (A_2), τη θερμοκρασία Curie ($771\text{ }^\circ\text{C}$), ο φερρίτης παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά. Συνεπώς, η παρουσία του φερρίτη προσδίδει στο χάλυβα και το χυτοσίδηρο (cast iron) τις μαγνητικές του ιδιότητες, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται ως σιδηρομαγνητικό υλικό [7-10]..

Για αυτό το λόγο, οι εργαλιοχάλυβες (tool steels), πάνω από τη θερμοκρασία σκλήρωσης, όπου ο φερρίτης μετασχηματίζεται σε ωστενίτη (austenite, $\gamma\text{-Fe}$), καθίστανται μη-μαγνητικοί. Οι περισσότεροι μαλακοί ανθρακοχάλυβες με ποσοστό άνθρακα έως περίπου 0,2% κ.β. ή αλλιώς μαλακοί χάλυβες (mild steels) περιέχουν φερρίτη και σεμεντίτη (cementite, Fe_3C) σχηματίζοντας μια σύνθετη δομή που ονομάζεται περλίτης (pearlite, $\alpha+\text{Fe}_3\text{C}$). Η ποσοστιαία συμμετοχή του περλίτη στους μαλακούς χάλυβες, αυξάνεται με την αύξηση της κατά βάρος περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα. Τέλος, οποιοδήποτε κράμα σιδήρου-άνθρακα χαρακτηριζόμενο μικροδομικά από κάποιο ποσοστό φερρίτη μπορεί να είναι θερμοδυναμικά ευσταθές σε θερμοκρασία δωματίου [7-10]..

Πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A_2 και έως τους $910\text{ }^\circ\text{C}$, ο φερρίτης είναι παραμαγνητικός (χάνει δηλ. τις μαγνητικές του ιδιότητες) αλλά διατηρείται θερμοδυναμικά ευσταθής και χαρακτηρίζεται ως βήτα φερρίτης ($\beta\text{-Fe}$). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται σπάνια καθώς ταυτίζεται κρυσταλλογραφικά και είναι ταυτόσημος με τη γεινιάζουσα φάση του $\alpha\text{-Fe}$ [7-10]..

Η μηχανική σκληρότητά του κυμαίνεται από 70 HV έως 200 HV ενώ το όριο εφελκυστικής τάσης (strength) είναι 280 N/mm^2 (280 Mpa) [8]..



Εικόνα 2-3: Παρουσία βήτα-φερρίτη ($\beta\text{-Fe}$) πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A_2 (θερμοκρασία Curie). Ο $\alpha\text{-Fe}$ είναι φερρομαγνητικός ενώ ο $\beta\text{-Fe}$ είναι παραμαγνητικός, όπως και ο $\gamma\text{-Fe}$.

2.3.1.2 δ-φερρίτης ή δ-Fe

Στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα, το οποίο κρυσταλλώνεται στο κυβικό χωροκεντρωμένο (body-centered cubic, BCC) σύστημα. Αποτελεί μια ευσταθή φάση του σιδήρου από τους 1390 °C έως τη θερμοκρασία τήξης (1539 °C). Η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στη δ-φάση του φερρίτη είναι 0.1% κ.β. στους 1492 °C [7-10].

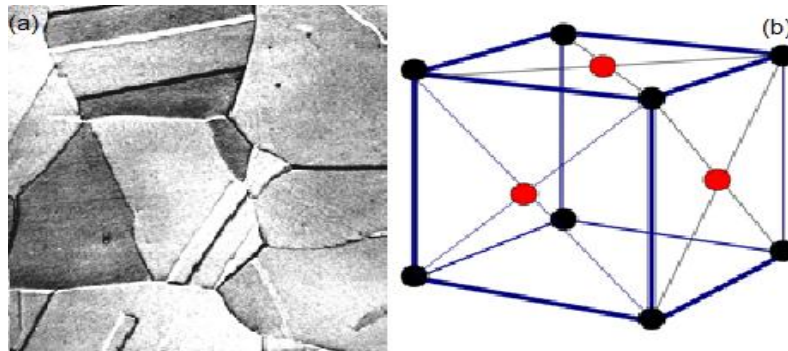
2.3.2 Ωστενίτης (γ-φάση, γ-Fe).

Στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα, το οποίο κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο (face-centred cubic, FCC) σύστημα. Το άτομο του C καταλαμβάνει τις πυκνές οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής στην κρυσταλλική κυψελίδα του FCC πλέγματος. Η πυκνή κυβική ενδοκεντρωμένη δομή επιτρέπει την αυξημένη διαλυτότητα του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη (austenite) συγκριτικά με το φερρίτη. Η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στον ωστενίτη είναι 0.8 % κ.β. στους 723 °C, ενώ καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται φτάνει το 2,00 % κ.β. στους 1148 °C. Ο ωστενίτης είναι μη-μαγνητικός (παραμαγνητικό) και θερμοδυναμικά ευσταθής σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από τους 910 °C έως τους 1400 °C. Έτσι, για παράδειγμα, στους χάλυβες με περιεκτικότητα άνθρακα 0.8 % κ.β., ο άνθρακας που περιέχεται στο φερρίτη και το σεμεντίτη, διαλύεται πιο εύκολα στον ωστενίτη πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία [7-10].

Κατά την απόψυξη του ωστενίτη, η φάση αυτή είτε μετασχηματίζεται σε φερρίτη και σεμεντίτη, σχηματίζοντας περλιτικές ή μαινιτικές δομές, είτε το πλέγμα υφίσταται μια μικρή παραμόρφωση οδηγώντας σε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Το κριτήριο που καθορίζει ποιος από τους παραπάνω μετασχηματισμούς θα πραγματοποιηθεί αποτελεί ο ρυθμός απόψυξης από την ωστενιτική φάση και η περιεκτικότητα σε άνθρακα. Κατ' επέκταση ο ρυθμός απόψυξης καθορίζει την ποσοστιαία συμμετοχή της κάθε φάσης ή του κάθε μικροδομικού συστατικού στον τελικό μικροδομικό ιστό καθώς επίσης και τις τελικές μηχανικές ιδιότητες (π.χ. σκληρότητα, αντοχή σε εφελκυσμό) του χάλυβα [7-10].

Για παράδειγμα, με βραδείς ρυθμούς απόψυξης, σχηματίζεται φερρίτης, περλίτης και σεμεντίτης, με σχετικά υψηλό ρυθμό ψύξης, σχηματίζεται μαινίτης, ενώ ο ταχύτατος ρυθμός απόψυξης (βαφή του χάλυβα, quenching) από την ωστενιτική περιοχή, οδηγεί στο σχηματισμό μαρτενσίτη (μαρτενσιτικό μετασχηματισμό). Επειδή ο σχηματιζόμενος μαρτενσίτης είναι ιδιαίτερα ψαθυρή φάση του χάλυβα και μάλιστα εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας, απαιτείται περεταίρω θερμική του κατεργασία (επαναφορά, tempering) που

οδηγεί στο σχηματισμό παραμένουστος μαρτενσίτη και επαναφερμένου ωστενίτη (retained austenite). Αυτή είναι η πιο κοινή θερμική κατεργασία που λαμβάνει χώρα στους χάλυβες υψηλών επιδόσεων (high-performance steels). Επίσης, στους μικροκραματωμένους χάλυβες (low-alloy steels), η ωστενιτική φάση σταθεροποιείται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων όπως το μαγγάνιο και το νικέλιο. Με αυτό τον τρόπο, διευκολύνεται η θερμική κατεργασία των χάλυβων αυτών. Στην περίπτωση των ωστενιτικών ανοξείδωτων χάλυβων (austenitic stainless steels), η υψηλή κραμάτωσή τους με γ -φερρογόνα κραματικά στοιχεία, οδηγεί στη σταθεροποίηση της ωστενιτικής φάσης σε θερμοκρασίες δωματίου. Αντίθετα, η προσθήκη πυρίτιου, μολυβδαίνιου και χρώμιου, αποσταθεροποιούν την ωστενιτική φάση, αυξάνοντας την ευτηκτική θερμοκρασία (η θερμοκρασία στην οποία ο φερρίτης και ο σεμεντίτης μετασχηματίζονται σε ωστενίτη) [7-10].

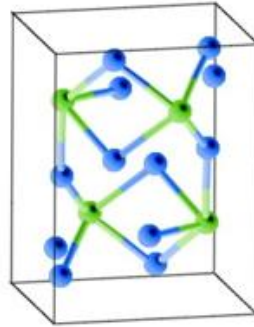


Εικόνα 2-4: (a) Τυπική μικροδομή ωστενίτη, (b) κυβικό ενδοκεντρωμένο (FCC) κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και τα άτομα του άνθρακα παρουσιάζονται ως κόκκινες σφαίρες στο κέντρο των εδρών του κύβου).

Ο ωστενίτης είναι όλκιμος και η μηχανική σκληρότητά του κυμαίνεται από 250 HV έως 300 HV [8].

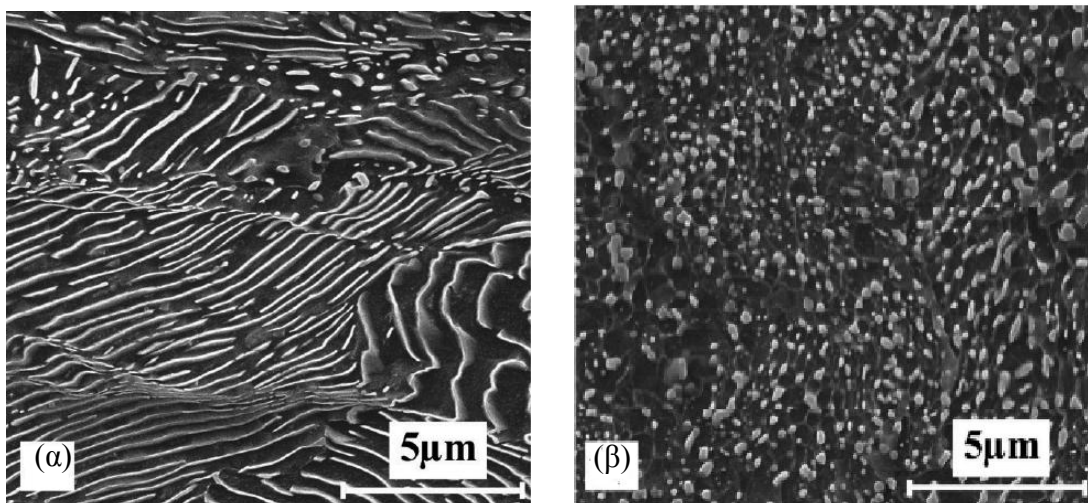
2.3.3 Σεμεντίτης (Fe_3C)

Πρόκειται για μεσομεταλλική ένωση παρεμβολής που κρυσταλλώνεται στο ορθορομβικό, σύστημα. Η σύσταση σε άνθρακα είναι απόλυτα καθορισμένη, σε ποσοστό ίσον προς 6,67% κ.β [7-10].



Εικόνα 2-5: Ορθορομβικό σύστημα στο οποίο κρυσταλλώνεται ο σεμεντίτης.

Στην περίπτωση των λευκών χυτοσιδήρων, σχηματίζεται κατά την διάρκεια της στερεοποίησης τους, ενώ στην περίπτωση των ανθρακούχων χαλύβων σχηματίζεται είτε κατά την απόψυξη του ωστενίτη, είτε κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη. Τους κοινούς ανθρακούχους υποευτηκτοειδείς χάλυβες ($C < 0,8 \%$ κ.β.), ο σεμεντίτης εμφανίζεται στην δομή του περλίτη ως σκουρόχρωμα φύλλα εναλλασσόμενα με ανοιχτόχρωμα φύλλα φερρίτη. Σε υπερευτηκτοειδείς χάλυβες παρουσιάζεται στον περλίτη αλλά σχηματίζει και ανεξάρτητους λευκούς φυλλοειδείς κόκκους [7-10].



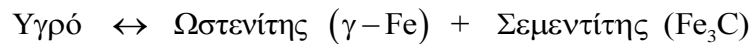
Εικόνα 2-6: Διαφορετικές μορφολογίες του σεμεντίτη. (α) Πλακοειδής σεμεντίτης και (β) σφαιροποιημένος σεμεντίτης.

Όπως οι περισσότερες μεσομεταλλικές ενώσεις, έτσι και το καρβίδιο του σιδήρου (σεμεντίτης - Fe_3C), είναι ένωση πολύ σκληρή και εύθραυστη. Η μηχανική σκληρότητά του κυμαίνεται από 850 HV έως 1100 HV [8].

2.3.4 Λεδεμβρουρίτης (ωστενίτη + σεμεντίτης, $\gamma-Fe + Fe_3C$)

Είναι μια σύνθετη ευτηκτική δομή φάσεων χαρακτηριζόμενη μορφολογικά από επάλληλα στρώματα (πλακίδια) ωστενίτη και σεμεντίτη. Παράγεται κατά την πήξη της υγρής φάσης

του χάλυβα με περιεκτικότητα σε άνθρακα 4,3% κ.β., σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τους 1130°C (ευτηκτική αντίδραση). Η ευτηκτική αντίδραση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

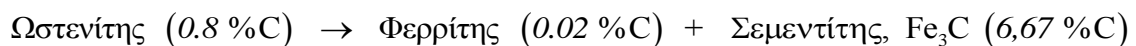


Δεν αποτελεί φάση, αλλά ευτηκτική δομή φάσεων (μικροδομικό συστατικό) και εμφανίζεται κυρίως κατά την στερεοποίηση των χυτοσιδήρων (κράματα σιδήρου-άνθρακα που περιέχουν περισσότερο από 2 % κ.β. άνθρακα). Οι χυτοσίδηροι που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό μικρότερο του 4,3% λέγονται υποευτηκτικοί ενώ αυτοί που περιέχουν περισσότερο από 4,3% άνθρακα λέγονται υπereυτηκτικοί [7-10].

2.3.5 Περλίτης (φερρίτης + σεμεντίτης, $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$)

Είναι μια σύνθετη ευτηκτοειδής δομή φάσεων χαρακτηριζόμενη μορφολογικά από επάλληλα στρώματα (πλακίδια) φερρίτη και σεμεντίτη. Ο περλίτης λοιπόν, δεν αποτελεί φάση, αλλά ευτηκτοειδή δομή φάσεων (μικροδομικό συστατικό) φερρίτη και σεμεντίτη [7-10].

Παράγεται κατά την πολύ αργή απόψυξη του ωστενίτη (ευτηκτοειδής μετασχηματισμός). Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη λαμβάνει χώρα στους 723 °C και η αντίδραση παρίσταται ως εξής:



Ο περλιτικός μετασχηματισμός είναι ένας διαχυτικός μετασχηματισμός, που πραγματοποιείται με την ετερογενή πυρήνωση και ανάπτυξη του περλίτη στα όρια των ωστενιτικών κόκκων. Η περλιτική δομή είναι περιοδική και χαρακτηρίζεται από την ενδολαμελική απόσταση. Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση των πλακιδίων, όσο πιο λεπτόκοκκος είναι ο περλίτης και τόσο μεγαλύτερη η σκληρότητά του, λόγω των πολλών διαφασικών ορίων που παρεμποδίζουν την ολίσθηση των διαταραχών. Να σημειωθεί ότι όταν ο περλίτης σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες είναι λεπτόκοκκος. Να σημειωθεί ότι, η ανακατανομή του άνθρακα μεταξύ των διαφόρων φάσεων κατά την ψύξη του χάλυβα πραγματοποιείται με διάχυση. Όταν ο ρυθμός ψύξεως είναι ιδιαίτερα αργός, δίνεται ο απαραίτητος χρόνος για την διάχυση διατηρώντας τις συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας [7-10].

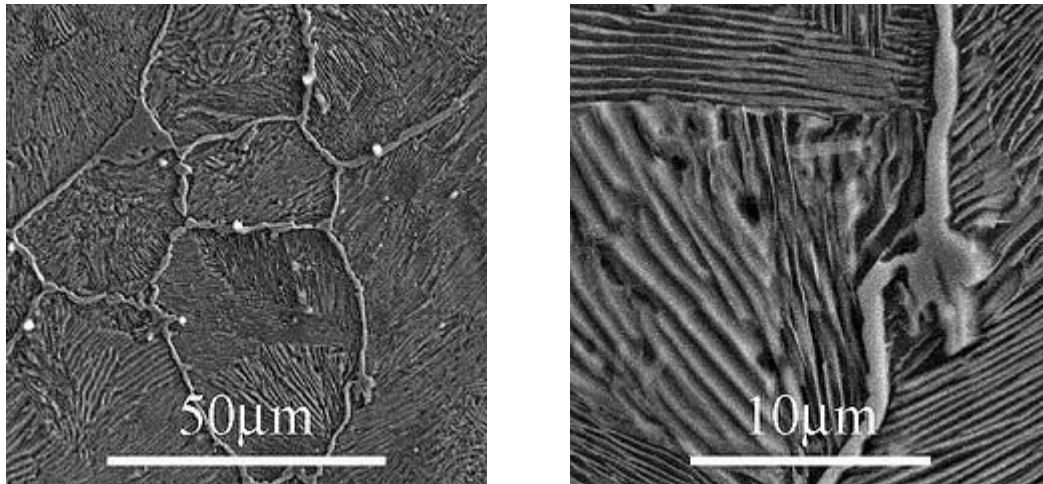
Οι χάλυβες που δεν περιέχουν κραματικά στοιχεία αντικαταστάσεως παρά μόνον άνθρακα ονομάζονται ανθρακοχάλυβες (carbon steels). Ανάλογα με την περιεκτικότητά

τους σε άνθρακα οι χάλυβες αυτοί διακρίνονται σε ευτηκτοειδείς (όταν η σύστασή του σε άνθρακα είναι $C = 0.8 \%$ κ.β.), υποευτηκτοηδείς (όταν η σύσταση του σε άνθρακα είναι μικρότερη από την ευτηκτοειδή, δηλ. $\% C < 0.8 \%$ κ.β.) και υπereυτηκτοειδείς (όταν η σύσταση του σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την ευτηκτοειδή, δηλ. $C > 0.8 \%$ κ.β.) [7-10].

Όταν ένας ευτηκτοειδής χάλυβας θερμανθεί στην ωστενιτική περιοχή και στη συνέχεια αποψυχθεί αργά, τότε η ευτηκτοειδής αντίδραση θα μετασχηματίσει τον ωστενίτη σε 100% περλίτη. Η πυρήνωση του φερρίτη ξεκινά από τα όρια των ωστενιτικών κόκκων και εξελίσσεται με τη μορφή παράλληλων πλακών φερρίτη και σεμεντίτη μέχρις ότου μετασχηματιστεί το 100% του ωστενίτη [7-10].

Κατά την αργή απόψυξη ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα, ένα ποσοστό του ωστενίτη μετασχηματίζεται σε φερρίτη κατά το πέρασμα από τη διφασική περιοχή ($\alpha+\gamma$), ενώ ο υπόλοιπος ωστενίτης εμπλουτίζεται διαρκώς σε άνθρακα, λόγω της μεγάλης διαφοράς που εμφανίζει ο φερρίτης με τον ωστενίτη στη στερεά διαλυτότητα του άνθρακα. Όταν ο ωστενίτης αποκτήσει την ευτηκτοειδή σύσταση ($0.8\%C$), η ευτηκτοειδής αντίδραση μετασχηματίζει τον ωστενίτη σε περλίτη. Η κατάσταση δεν αλλάζει σημαντικά κατά την περαιτέρω ψύξη του χάλυβα στη θερμοκρασία δωματίου. Ο φερρίτης, που σχηματίζεται κατά την ψύξη ονομάζεται προευτηκτοειδής φερρίτης, γιατί προέρχεται από το μερικό μετασχηματισμό του ωστενίτη, πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία. Έτσι οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες αποτελούνται από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, και η δομή τους ονομάζεται φερριτοπερλιτική [7-10].

Κατά την αργή απόψυξη ενός υπereυτηκτοειδή χάλυβα, ένα μέρος του αρχικού ωστενίτη θα μετασχηματιστεί σε σεμεντίτη, κατά το πέρασμα από τη διφασική περιοχή ($\alpha+\gamma$). Ο σεμεντίτης αυτός, πυρηνώνεται στα όρια των ωστενιτικών κόκκων αποσπώντας διαρκώς άτομα άνθρακα από τον ωστενίτη και επειδή σχηματίζεται πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ονομάζεται προευτηκτοειδής σεμεντίτης. Έτσι η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα μειώνεται τείνοντας προς την ευτηκτοειδή σύσταση ($0.8\%C$). Στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ο εναπομένον ωστενίτης μετασχηματίζεται σε περλίτη μέσω της ευτηκτοειδούς αντιδράσεως. Επομένως, ένας υπereυτηκτοειδής χάλυβας αποτελείται από κόκκους περλίτη, στα όρια των οποίων υπάρχει προευτηκτοειδής σεμεντίτης [7-10].



Εικόνα 2-7: Τυπική μικροδομή του περλίτη.

Η μηχανική σκληρότητα της περλιτικής δομής αυξάνεται όσο μειώνεται η απόσταση των πλακιδίων φερρίτη-σεμεντίτη. Η μηχανική σκληρότητα του κυμαίνεται από 250 HV έως 350 HV. Επειδή ο περλίτης περιέχει πολύ φερρίτη, είναι και αυτός όλκιμος αν και με μειωμένη ολκιμότητα και δυσθραυστότητα συγκριτικά με τον φερρίτη. Η μείωση της ολκιμότητας οφείλεται στη λειτουργία των διεπιφανειών α -Fe₃C ως θέσεις για πυρήνωση ρωγμών. Επίσης, στους απλούς ανθρακοχάλυβες, η αύξηση του άνθρακα (αύξηση του ποσοστού του περλίτη) οδηγεί σε αύξηση τόσο του ορίου διαρροής (σ_y) όσο και της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού (UTS). Η αύξηση του UTS στον περλίτη, του δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη εργοσκλήρυνση (work-hardening) της περλιτικής δομής έναντι της φερριτικής δομής. Η μείωση της ολκιμότητας σε συνδυασμό με την αυξημένη εργοσκλήρυνση περιορίζει την πλαστική παραμόρφωση στην αιχμή των ρωγμών [7-10].

2.3.6 Μαρτενσίτης (martensite)

Ο μαρτενσίτης είναι μετασταθής φάση του χάλυβα που σχηματίζεται κατά την ταχύτατη απόψυξη (βαφή) του ωστενίτη (γ -Fe). Θεωρείται ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα φερρίτη με άνθρακα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός δεν είναι διαχυσιακός, καθώς τα άτομα του άνθρακα δεν προλαβαίνουν να μετακινηθούν από τις οκταεδρικές θέσεις του ωστενιτικού πλέγματος. Αυτό σημαίνει ότι ο άνθρακας καταλαμβάνει τις ίδιες θέσεις παρεμβολής στον ωστενίτη και στον μαρτενσίτη, με αποτέλεσμα το κυβικό εδροκεντρωμένο (FCC) πλέγμα του ωστενίτη να μετασχηματίζεται στο τετραγωνικό χωροκεντρωμένο (body centered tetragonal, BCT) πλέγμα του μαρτενσίτη, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ο άνθρακας [7-10].

Η παρουσία του άνθρακα σε οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής στο FCC πλέγμα του ωστενίτη προκαλεί συμμετρικές παραμορφώσεις του πλέγματος και κατ' επέκταση περιορισμένη ισχυροποίηση στερεού διαλύματος. Αντίθετα, η κατάληψη των ίδιων θέσεων στο BCT πλέγμα του μαρτενσίτη προκαλεί μη-συμμετρικές (τετραγωνικές) παραμορφώσεις που οδηγούν σε σημαντικότερη ισχυροποίηση στερεού διαλύματος [7-10].

Η παρουσία του άνθρακα σε οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής προκαλεί ασύμμετρη παραμόρφωση στο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι λωρίδες και τα πλακίδια του μαρτενσίτη έχουν πολύ μικρό μέγεθος σε σύγκριση με τους μητρικούς κόκκους του ωστενίτη, με συνέπεια την σημαντική αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα. Επίσης, τα πολλά νέα όρια στην μικροδομή του μαρτενσίτη εμποδίζουν την μετακίνηση των διαταραχών και συμβάλλουν έτσι στην αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα [7-10].

Η δομή του μαρτενσίτη είναι βελονοειδής. Σε χάλυβες με λιγότερο από 0,4% κ.β. ποσοστό άνθρακα, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή λωρίδων, ενώ σε χάλυβες με περισσότερο από 0,6% κ.β. ποσοστό άνθρακα, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή πιο λεπτών πλακιδίων. Σε χάλυβες με περιεχόμενο άνθρακα μεταξύ 0,4 και 0,6% κ.β., παρατηρούνται φακοειδείς λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Ο μαρτενσίτης παρουσιάζει επίσης εσωτερική δομή που χαρακτηρίζεται από διδυμίες και έντονη παρουσία διαταραχών [7-10].

Η βαφή του χάλυβα προκαλεί συχνά παραμορφώσεις και μικρορωγματώσεις λόγω συσσώρευσης τοπικών τάσεων. Ο βαμμένος χάλυβας γίνεται ψαθυρός εξαιτίας της παρουσίας μαρτενσίτη και γι' αυτό η κατεργασία της βαφής συνήθως συνοδεύεται από επαναφορά σε θερμοκρασίες 150–650 °C, ώστε να γίνει και πάλι ο χάλυβας όλκιμος με μικρή μείωση της σκληρότητάς του [7-10].

2.3.7 Μπαινίτης (Bainite)

Ο μπαινίτης αποτελεί μια μικρογραφική δομή του χάλυβα που προκύπτει όταν ο χάλυβας θερμανθεί σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν ψυχθεί σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550 °C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη (περίπου 250 °C). Η δομή του αποτελείται από λεπτά πλακίδια φερρίτη καθώς και σωματίδια καρβιδίου (κυρίως σεμεντίτη) [7-10].

Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός είναι δύσκολος να μελετηθεί καθώς συνδυάζει δηλαδή χαρακτηριστικά διαχυτικών μετασχηματισμών με πυρήνωση και ανάπτυξη (περλιτικοί μετασχηματισμοί) όσο και μαρτενσιτικών μετασχηματισμών (διατμησιακοί, μη-διαχυσιακοί μετασχηματισμοί). Ο μπαινίτης, όπως και ο περλίτης, είναι μίγμα φάσεων φερρίτη (μπαινιτικού φερρίτη) και καρβιδίου, που σημαίνει ότι κατά τον μπαινιτικό μετασχηματισμό, ο άνθρακας κατανέμεται διαφορετικά στις δύο φάσεις, γεγονός που απαιτεί διάχυση του άνθρακα. Αντίστοιχα, ο μπαινιτικός φερρίτης αναπτύσσεται σε πλακίδια και παρουσιάζει την χαρακτηριστική βελονοειδή μορφή του μαρτενσίτη. Μάλιστα η παραμόρφωση της επιφάνειας ενός δοκιμίου που υφίσταται μπαινιτικό μετασχηματισμό μαρτυρά σημαντικές διατμητικές παραμορφώσεις του πλέγματος, όπως και στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Βέβαια πρέπει να τονίσουμε ότι η ανάπτυξη των μπαινιτικών πλακιδίων είναι πολύ πιο αργή από αυτή των μαρτενσιτικών, λόγω του χρόνου που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η διάχυση του άνθρακα [7-10].

Ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού διακρίνουμε τον μπαινίτη σε *άνω μπαινίτη* (upper bainite), που πραγματοποιείται μεταξύ 400 και 500 °C, και *κάτω μπαινίτη* (lower bainite), που πραγματοποιείται μεταξύ 250 και 400 °C [7-10].

2.3.7.1 Ανώτερος μπαινίτης (upper bainite)

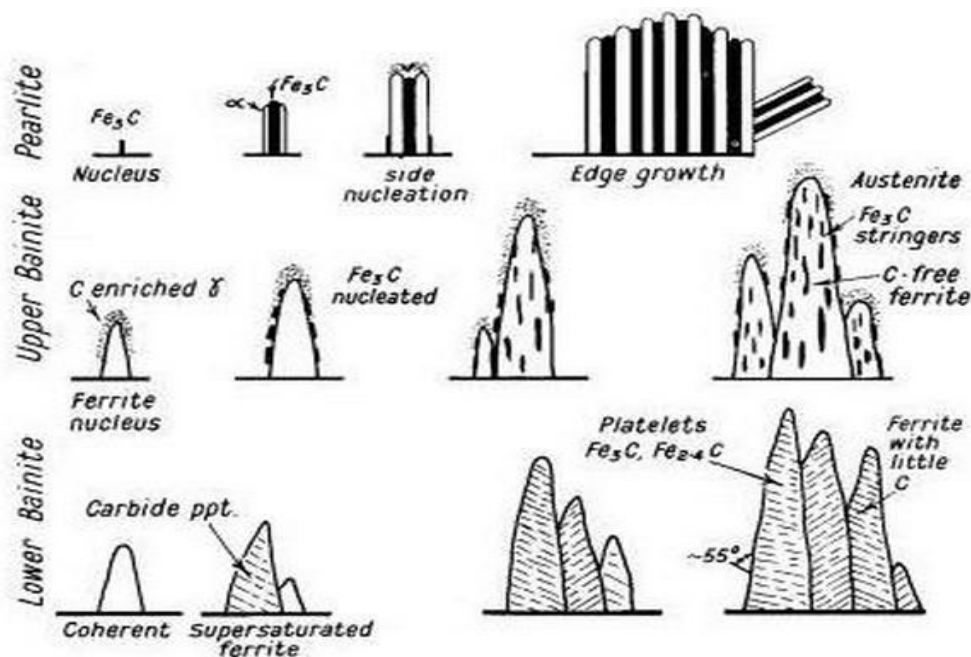
Η δομή ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η πυρήνωση και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων μπαινιτικού φερρίτη, με παράλληλο εμπλουτισμό του ωστενίτη σε άνθρακα, αφού η στερεά διαλυτότητα του άνθρακα στον φερρίτη είναι πολύ μικρή. Στο δεύτερο στάδιο ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα οδηγεί στην καθίζηση σεμεντίτη μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη. Η μορφολογία του σεμεντίτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα. Σε χάλυβες με υψηλό ποσοστό άνθρακα, ο σεμεντίτης σχηματίζει συνεχείς λωρίδες που διαχωρίζουν τα πλακίδια του φερρίτη. Όταν όμως η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι χαμηλή, τότε σχηματίζονται μικρά σωματίδια σεμεντίτη. Ο άνω μπαινίτης αναπτύσσεται σε ομάδες παράλληλων πλακιδίων που ονομάζονται *μπαινιτικές δεσμίδες* (bainite sheaves) [7-10].

2.3.7.2 Κατώτερος μπαινίτης (lower bainite)

Ο κατώτερος μπαινίτης σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (250-400 °C). Η σημαντικότερη διαφορά του με τον ανώτερο μπαινίτη είναι ότι κατά την ανάπτυξη του φερρίτη, εκτός από τον εμπλουτισμό του ωστενίτη σε άνθρακα, λαμβάνει χώρα και καθίζηση σεμεντίτη μέσα στον φερρίτη. Έτσι στον κατώτερο μπαινίτη σχηματίζεται

σεμεντίτης τόσο μέσα στα πλακίδια του μπαινιτικού φερρίτη όσο και μεταξύ των πλακιδίων αυτών, με απ' ευθείας καθίζηση από τον ωστενίτη [7-10].

Λόγω της καθίζησης του σεμεντίτη στον μπαινιτικό φερρίτη ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα είναι μικρότερος με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μικρότερα σωματίδια σεμεντίτη μεταξύ των φερριτικών πλακιδίων. Γενικά η διασπορά των καρβιδίων είναι λεπτότερη στον κατώτερο μπαινίτη και το γεγονός αυτό εξηγεί την μεγαλύτερη ολκιμότητα του κατώτερο μπαινίτη σε σχέση μ' αυτήν του ανώτερο μπαινίτη. Στους χάλυβες που περιέχουν υψηλό ποσοστό Si (π.χ. 1% κ.β.) αναστέλλεται η καθίζηση σεμεντίτη στον μπαινιτικό φερρίτη. Αντ' αυτού σχηματίζεται ε-καρβίδιο. Το ίδιο συμβαίνει και στους κραματωμένους χάλυβες όπου σχηματίζεται ε-καρβίδιο ή άλλα σύνθετα καρβίδια με τη συμμετοχή των στοιχείων αντικαταστάσεως [7-10].



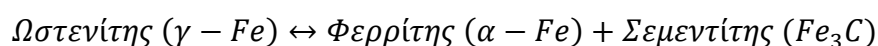
Εικόνα 2-8: Σχηματισμός περλίτη (pearlite), ανώτερου (upper) και κατώτερου (lower) μπαινίτη.

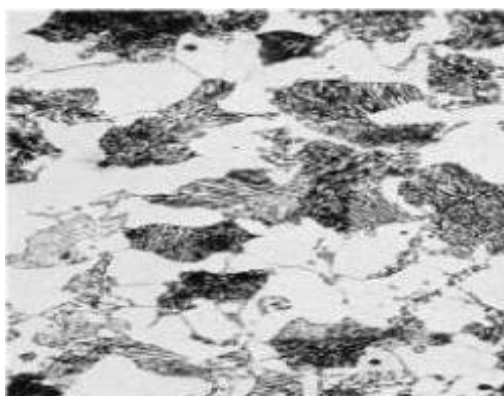
2.4 Υποευτηκτοειδής Χάλυβας

2.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν η σύσταση του ανθρακούχου χάλυβα σε άνθρακα είναι μικρότερη από την ευτηκτοειδή, δηλ. % C < 0.8 % κ.β., τότε ο χάλυβας αυτός ονομάζεται υποευτηκτοειδής [7-10].

Ο χάλυβας αυτός χαρακτηρίζεται μικροδομικά ως φερριτοπερλιτικός, λόγω του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού που λαμβάνει χώρα στους 723 °C [7-10].





Εικόνα 2-9: Τυπική μικροδομή φερριτοπερλιτικού χάλυβα.

2.4.2 Ονοματολογία χαλύβων σύμφωνα με την Society of Automotive Engineers (SAE) και την American Iron and Steel Institute (AISI)

Σύμφωνα με τη SAE/AISI, όλα τα εμπορικά μέταλλα και κράματα, χαρακτηρίζονται από έναν τετραψήφιο σύστημα αρίθμησης. Τα δύο πρώτα ψηφία δηλώνουν το είδος του κράματος, ενώ τα δύο τελευταία την ποσοστιαία συμμετοχή του άνθρακα επί τοις εκατό.

Πίνακας 2-1: Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με το SAE/AISI σύστημα.

Steel	Number
a) Carbon steel	
Carbon steel SAE-AISI	1XXX
Plain Carbon	10XX
Free machining (resulphurized)	11XX
Resulphurized, rephosphorised	12XX
b) Alloy Steel	
Manganese	13XX
Molybdenum	4XXX
C-Mo(0.25% Mo)	40XX
CR-Mo(0.70% Cr, 0.15% Mo)	41XX
Ni-Cr-Mo(1.8% Ni, 0.65% CR)	43XX
Ni-Mo(1.75% Ni)	46XX
Ni-Cr(0.45% Ni, 0.2% Mo)	47XX
Ni-Mo(3.5% Ni, 0.25% Mo)	48XX
Chromium	5XXX
0.5% Cr	50XX
1.0% Cr	51XX
1.5% Cr	52XX
Corrosion-heat resistant	514XX
Chromium-Vanadium	6XXX
1% Cr, 0.12% V	61XX
Silicon Manganese	
0.85% Mn, 2% Si	92XX
Triple-alloy Steels	
0.55% Ni, 0.50% Cr, 0.20% Mo,	86XX
0.55% Ni, 0.50% Cr, 0.25% Mo	87XX
3.25% Ni, 1.2% Cr, 0.12% Mo	93XX
0.45% Ni, 0.4% Cr, 0.12% Mo	94XX
0.45% Ni, 0.15% Cr, 0.2% Mo	97XX
1.00 % Ni, 0.8% Cr, 0.25% Mo	98XX
Boron (~0.05% Mn)	XXBXX

Stainless and heat resisting steels

2XX - Chromium nickel -manganese type

3XX- Chromium-nickel types

4XX- Straight chromium types

5XX- Low chromium types

All stainless steels are produced in electric furnace.

2.4.3 Ταξινόμηση ανθρακούχων χάλυβων

Οι ανθρακούχοι χάλυβες είναι κράματα σιδήρου άνθρακα τα οποία περιέχουν έως 2.06% άνθρακα, 1.65% μαγγάνιο, 0.5% πυρίτιο, θείο και φώσφορο. Η ποσοστιαία συμμετοχή σε άνθρακα καθορίζει την ολκιμότητα (ductility) και την αντοχή (strength) του χάλυβα. Όσο πιο υψηλή είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του και μικρότερη η ολκιμότητά του.

Οι ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται:

- Ανθρακούχους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (Low carbon steels, $C < 0.25 \%$). Χαρακτηρίζονται από καλή διαμορφωσιμότητα (formability) και συγκολλησιμότητα (weldability), χαμηλή αντοχή (strength) και μικρό κόστος. Χρησιμοποιούνται στην παραγωγή αλυσίδων, σωλήνων, συρμάτων, καρφιών και ορισμένων τμημάτων της μηχανής.
- Ανθρακούχους χάλυβες μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα (Medium carbon steels, $C < 0.25 \%$ - 0.55%). Χαρακτηρίζονται από καλή δυσθραυστότητα (toughness) και ολκιμότητα, σχετικώς καλή αντοχή και μπορεί να σκληρύνουν με βαφή. Βρίσκουν εφαρμογή σε ρολά, άξονες, βίδες, στροφαλοφόρους άξονες, εξαρτήματα μηχανών που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία.
- Ανθρακούχους χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (High carbon steels, $C > 0.55 \%$). Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, σκληρότητα και αντιτριβικές ιδιότητες (wear resistance), και σχετική ολκιμότητα. Εφαρμόζονται σε ελάσματα, συρματόσχοινα, κατσαβίδια, σφυριά, κλειδιά, πριόνια.
- Εργαλιοχάλυβες (Tool steels, $C > 0.8 \%$). Θεωρείται υποκατηγορία των ανθρακαχάλυβων με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλή αντοχή, σκληρότητα και αντιτριβική ικανότητα, ενώ αντίθετα παρουσιάζουν πολύ μικρή ολκιμότητα και συγκολλησιμότητα. Βρίσκουν εφαρμογή σε λεπίδες κοπής, ελατήρια, φρέζες, μαχαίρια, ξυραφάκια.

Σύμφωνα με το SAE/AISI σύστημα ταξινόμηση των χαλύβων το πρώτο ψηφίο που τους χαρακτηρίζει είναι το «1» ενώ το δεύτερο ψηφίο περιγράφει τη διαδικασία τροποποίησης που έχουν υποβληθεί:

- 0 – μη τροποποιημένοι
- 1 – επαναθειωμένοι (resulfurized)
- 2 – επαναθειωμένοι και επαναφωσφοριομένοι (resulfurized and rephosphorized)
- 5 – μη-επαναθειωμένοι (non- resulfurized) με την περιεκτικότητα σε Mn να ξεπερνά το 1.0%

Τα τελευταία δύο ψηφία δηλώνουν την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα σε 0.01%. Συνεπώς για τους υποευτηκτοειδής ανθρακούχους χάλυβες τα δύο τελευταία ψηφία δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερα του 08.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η χημική σύσταση και η μηχανικές ιδιότητες μερικών ανθρακούχων χαλύβων.

Πίνακας 2-2: Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες κάποιων ανθρακούχων χαλύβων.

SAE/AISI Ποιότητα χάλυβα	Χημική σύσταση				Μηχανικές ιδιότητες							
	C, %	Mn,%	P,% max	S,% max	Ψυχρή έλαση				Θερμή έλαση			
					σ_y	UTS	ϵ	HN	σ_y	UTS	ϵ	HN
1006	0.08 max	0.35 max	0.04	0.05	285	330	20	55	165	295	30	49
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05	305	365	20	60	180	325	28	55
1020	0.17-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05	205	420	15	73	165	380	25	66
1030	0.27-0.34	0.60-0.90	0.04	0.05	440	525	12	80	260	470	20	75
1045	0.42-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05	530	625	12	88	310	565	16	84
1070	0.65-0.76	0.60-0.90	0.04	0.05	385	703	12	94	495	640	10	91
1090	0.85-0.98	0.60-0.90	0.04	0.05	540	696	10	92	460	841	10	98
1117	0.14-0.20	1.10-1.30	0.04	0.08-0.13	400	475	12	86	220	400	25	66
1547	0.43-0.51	1.35-1.65	0.04	0.05	605	710	10	93	360	650	15	91

σ_y είναι το όριο διαρροής σε MPa, UTS είναι το όριο εφελκυστικής αντοχής σε MPa, ϵ είναι η ολκιμότητα επί τοις εκατό (%) και HN η σκληρότητα RB.

2.4.4 Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ανθρακούχους χάλυβες

2.4.4.1 Μαγγάνιο

Το Μαγγάνιο (Mn) είναι γ-φερρογόνο στοιχείο που διευρύνει την περιοχή του ωστενίτη, ελαττώνοντας παράλληλα τις θερμοκρασίες πραγματοποίησης του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού (A1) και ωστενιτοποίησης (A3). Το ποσοστό του δεν ξεπερνά το 1.65%. Υψηλά όμως ποσοστά μαγγανίου οδηγούν στο σχηματισμό MnS, που βελτιώνει μεν την ολκιμότητα του χάλυβα, λόγω παρεμποδιστικού σχηματισμού FeS, αλλά ευνοεί τη διάβρωση οπών. Η επίδραση του μαγγανίου στις μηχανικές ιδιότητες είναι ελάχιστη. Χρησιμοποιείται για τη σκλήρωση στερεού διαλύματος και έχει μια μικρή επίδραση στην ευθραυστότητα [7-10].

2.4.4.2 Πυρίτιο

Το Πυρίτιο (Si) είναι α-φερρογόνο στοιχείο που διευρύνουν την περιοχή του φερρίτη. Το ποσοστό του δεν ξεπερνά το 0.5%. Χρησιμοποιείται για την αποξείδωση σε κατάσταση τήγματος. Το πυρίτιο αυξάνει την αντίσταση στο σχηματισμό ψαθυρών οξειδίων [7-10].

2.4.4.3 Άνθρακας

Ο άνθρακας (C) είναι γ-φερρογόνο στοιχείο περιέχεται στους ανθρακούχους χάλυβες σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 2.06%. Υψηλά ποσοστά άνθρακα προσδίδουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά μειώνουν τη δυσθραυστότητα. Ο άνθρακας είναι ένα ισχυρό μέσο σκλήρωσης στερεού διαλύματος (solid solution strengthening), ενώ έχει δυσμενή επίδραση στη μηχανουργική κατεργασιμότητα του χάλυβα [7-10].

Πίνακας 2-3: Επίδραση κραματικών στοιχείων στους χάλυβες.

Κραματικό στοιχείο	Επίδραση
Fe	Το βασικό στοιχείο των χάλυβων
C	Καθορίζει το είδος του χάλυβα
S	Μειώνει την αντοχή
P	Μειώνει την αντοχή
O	Μειώνει την αντοχή.
Mn	Ενισχύει την αντοχή.
Ni	Ενισχύει την αντοχή και την δυσθραυστότητα.
W	Σκληραίνει και αυξάνει την αντοχή του χάλυβα στη θερμότητα.
Cr	Ενισχύει την αντίσταση στους αιφνιδιασμούς.
V	Απομακρύνει τις ακαθαρσίες (purifier) και ενισχύει την αντίσταση στην κόπωση.
Si	Σκληραίνει το χάλυβα.
Ti	Απομακρύνει το άζωτο και το οξυγόνο.
Mo	Σκληραίνει και αυξάνει την αντοχή του χάλυβα στη θερμότητα.
Al	Αποξειδωτικό μέσο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση μαγνητικών μη-καταστροφικών μεθόδων (Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen και βρόχος υστέρησης) για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας της συγκόλλησης δοκιμίων υποευθηκτοειδούς χάλυβα. Η αυτογενής τεχνική συγκόλλησης που επιλέχθηκε για την ένωση των μεταλλικών μερών του χάλυβα ήταν η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding, EBW).

Το αρχικό δείγμα που παρελήφθη παρουσιάζεται στην εικόνα 3-1, ενώ το συγκολλημένο δείγμα παρουσιάζεται στην εικόνα 3-2. Σε ό,τι αφορά, τη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες του υπό εξέταση χάλυβα θα αναλυθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

3.2 Μεθοδολογία

Για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας συγκόλλησης των δειγμάτων, με μη-καταστροφικό έλεγχο (Non-Destructive Evaluation, NDE), χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

1. Μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (Magnetic Barkhausen Noise, MBN) και
2. Απεικόνιση των βρόχων υστέρησης (B-H loops)

Με τη χρήση της μεθόδου του μαγνητικού θορύβου Barkhausen, πραγματοποιήθηκαν τόσο γραμμικές όσο και γωνιακές σημειακές μετρήσεις. Μέσω των γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου, προσδιορίστηκε η χωρική κατανομή, των διαφόρων μετρήσιμων παραμέτρων του, στην επιφάνεια των δειγμάτων, από την οποία εξήχθησαν σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αξιοπιστία και καταλληλότητα της συγκόλλησης καθώς επίσης και για τη μικροδομική-μορφολογική ομοιογένεια της κρυσταλλικής δομής και των διακυμάνσεων των τιμών της μακροσληρότητας στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Η μαγνητική απόκριση των γωνιακών μετρήσεων του θορύβου ανέδειξε, μακροσκοπικά, τον άξονα της μαγνητικής ανισοτροπίας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.

Ωστόσο, οι παραπάνω μετρήσεις είναι σημειακές επιφανειακές. Συνεπώς, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, δεν

αφορούν όλο τον όγκο της συγκόλλησης. Μέσω της απεικόνισης του βρόχου υστέρησης, προσδιορίζονται μαγνητικές παράμετροι/ιδιότητες της κάθε ζώνης της συγκόλλησης που αφορούν όλο τον όγκο των δειγμάτων. Οι μεταβολές των τιμών των παραμέτρων αυτών ως συνάρτηση των ζωνών συγκόλλησης, οδηγούν με τη σειρά τους στον ποιοτικό έλεγχο της συγκόλλησης.

Επιπρόσθετα κρίθηκε αναγκαίος ο μικροδομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων, μέσω οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, καθώς επίσης και η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου δοκιμίου (μίκρο-μάκρο-σκληρότητα, όριο διαρροής, μέγιστη εφελκυστική τάση θραύσης) με σκοπό την συσχέτιση των μαγνητικών ιδιοτήτων και των δομικών χαρακτηριστικών του συγκολλημένου υλικού.

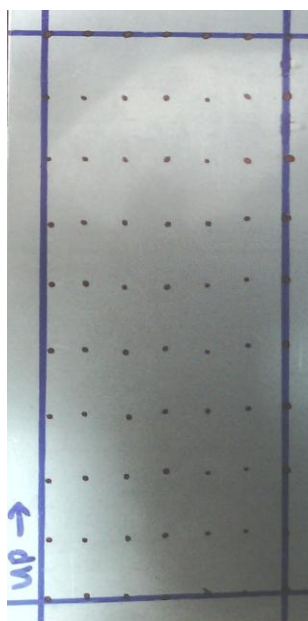
3.3 Διαστασιολογικός έλεγχος δειγμάτων

3.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού που παρελήφθη

Το αρχικό υλικό που παρελήφθη παρουσιάζεται στην εικόνα 3-1. Επιλέχθηκε να συγκολληθεί μαλακός υποευθηκτοειδής χάλυβας ποιότητας AISI 1008. Οι διαστάσεις του αρχικού δείγματος αναγράφονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 3-1: Διαστάσεις του αρχικού δείγματος που παρελήφθη.

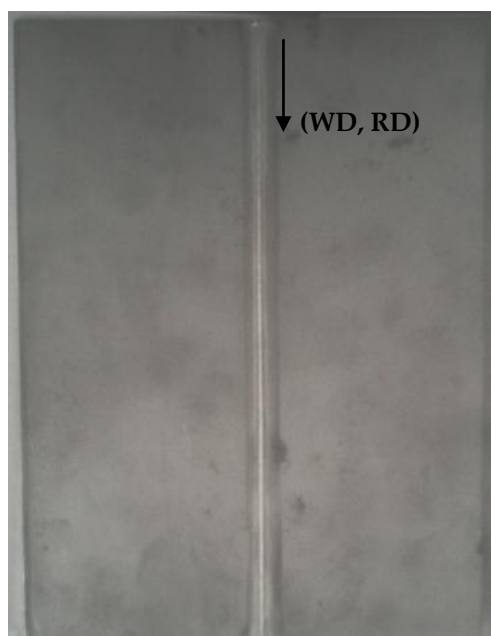
Διαστάσεις(mm)	
Πάχος	15
Μήκος	80
Πλάτος	200



Εικόνα 3-1: Δείγμα αναφοράς χάλυβα AISI 1008.

3.3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συγκολλημένου δείγματος

Στο υλικό αναφοράς πραγματοποιήθηκαν μετωπικές συγκολλήσεις, ανοικτής συμβολής με σκοπό τον προσδιορισμό, με τη χρήση μαγνητικών μη-καταστροφικών τεχνικών, της κατανομής των παραμενουσών τάσεων σε όλη την επιφάνεια των συγκολλημένων μεταλλικών τεμαχίων. Το συγκολλημένο δοκίμιο παρουσιάζεται στην εικόνα 3-2.



Εικόνα 3-2: Συγκολλημένα δοκίμια AISI 1008 χάλυβα με μέθοδο EBW. Στην εικόνα σημειώνονται οι διευθύνσεις της έλασης (RD) και της συγκόλλησης (WD).

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται, συνοπτικά, οι παράμετροι της συγκόλλησης.

Πίνακας 3-2: Παράμετροι συγκόλλησης EBW.

Παράμετροι συγκόλλησης	Μέθοδος συγκόλλησης EBW
Accelerating Voltage of electrons	40 kV
Beam Current	85 mA
Beam Focus	6.85 A
Travel Speed	1.65 m/min
Type of weld passes	Single pass
Heat Input	1.2 kJ · cm ⁻¹

Κύριο χαρακτηριστικό της ανωτέρω συγκόλλησης είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε συγκεντρωμένη ροή θερμικής ενέργειας, ικανής να προκαλέσει την τοπική τήξη των επιμέρους αυτογενών μεταλλικών μερών. Η θερμική παροχή (Q) είναι η παράμετρος που καθορίζει τη διαμόρφωση των ζωνών της συγκόλλησης, εφόσον τα δείγματα προέρχονταν από την ίδια ποιότητα ηλεκτρικού χάλυβα και βρίσκονταν στην ίδια κατάσταση ενδοτράχυνσης.

Η θερμική παροχή δίνεται από τον τύπο:

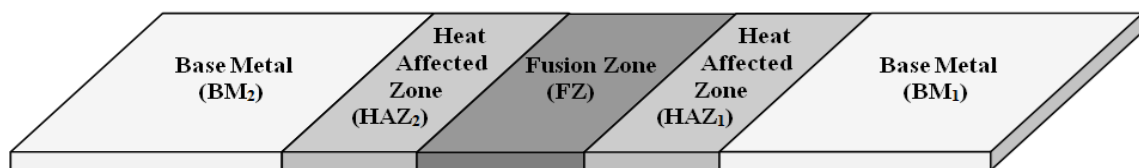
$$Q = \frac{V \cdot I \cdot 60}{u \cdot 1000} \cdot n \quad (1)$$

- όπου
- Q: θερμική παροχή (kJ/mm)
 - V: διαφορά δυναμικού, τάση ηλεκτρικού τόξου (V)
 - I: ένταση ηλεκτρικού ρεύματος συγκόλλησης(A)
 - u: ταχύτητα προχώρησης (mm/min)
 - n: συντελεστής απόδοσης θερμότητας

Όσο πιο υψηλή είναι η παροχή θερμότητας στο προς συγκόλληση μέταλλο, τόσο μεγαλύτερη είναι η χρονική παραμονή του στις υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, η υψηλή θερμική παροχή ευνοεί την αργή απόψυξη, με αποτέλεσμα οι κόκκοι να έχουν τον απαραίτητο χρόνο ώστε να αναπτυχθούν, οδηγώντας στο σχηματισμό μιας διευρυμένης θερμικά επηρεασμένης ζώνης και στην ανάπτυξη μιας χοντρόκοκκης δομής στη ζώνη αυτή.

Για το ίδιο πάχος συγκολλημένου υλικού, εκτός από το ποσό της θερμικής παροχής, την μορφολογία και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε ζώνης της συγκόλλησης καθορίζει η ταχύτητα (ή ο χρόνος, ή ο ρυθμός) απόψυξης των δοκιμίων αυτών. Τα δοκίμια ηλεκτρικού χάλυβα είναι καλύτεροι αγωγοί της θερμότητας σε σχέση με τον αέρα. Επομένως, έχουν λιγότερες διεξόδους διαρροής μέσω του λεπτού πάχους τους. Αυτό σημαίνει ότι, τα δοκίμια χάνουν την θερμοκρασία που απάγουν λόγω της συγκόλλησης, με μικρότερη ταχύτητα δηλαδή σε μεγαλύτερο χρόνο, έναντι παχύτερων δοκιμίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βραδύτερη απόψυξη των λεπτότερων δοκιμίων έναντι των παχύτερων.

Στο συγκολλημένο δοκίμιο, διαμορφώνονται από άποψη δομής και ιδιοτήτων, τρεις κύριες ζώνες (εικόνα 3-3): το μέταλλο βάσης (base metal, BM), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zone, HAZ) και η ζώνη τήξης (fusion zone, FZ).



Εικόνα 3-3: Διαστάσεις της εκάστοτε ζώνης συγκόλλησης στο συγκολλημένο δοκίμιο.

3.4 Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων

3.4.1 Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen

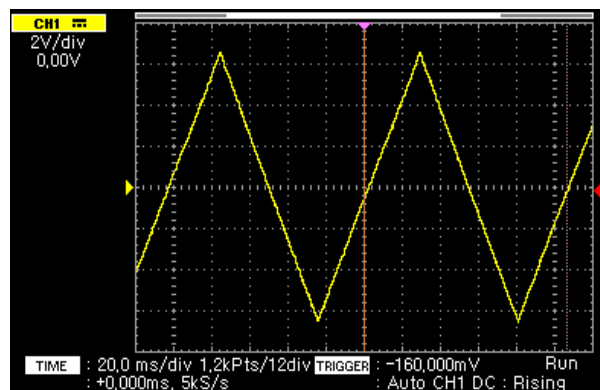
3.4.1.1 Διάταξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen

Με τη χρήση της συσκευής MEB-2cG (εικόνα 3-4), λήφθηκε η απόκριση του MBN στην άνω και κάτω επιφάνεια των συγκολλημένων δειγμάτων.



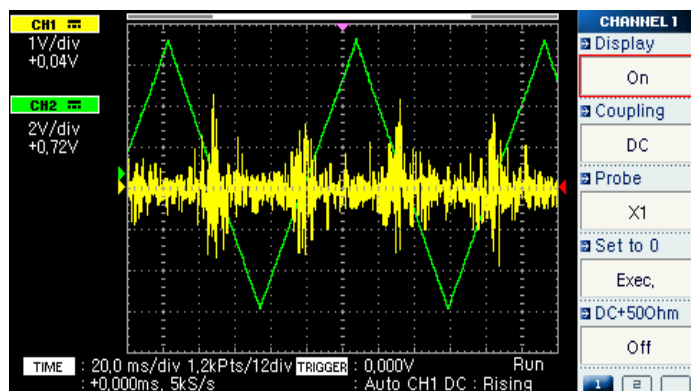
Εικόνα 3-4: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

Ο αισθητήρας Barkhausen αποτελείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη σε σχήμα Π, όπου στην μεγάλη του πλευρά είναι τυλιγμένο ένα πηνίο διέγερσης (excitation coil). Στο πηνίο αυτό εφαρμόζεται ένα τριγωνικό σήμα με συχνότητα 10Hz και πλάτος παλμού από κορυφή σε κορυφή 14Volt (εικόνα 3-5), με αποτέλεσμα να διεγείρεται με πεδίο το υπό εξέταση φερρομαγνητικό υλικό [11-23].



Εικόνα 3-5: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο του τριγωνικού σήματος διέγερσης που εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης συχνότητας 10Hz και πλάτους, από κορυφή σε κορυφή, 14V.

Ο μαγνητικός θόρυβος (εικόνα 3-6) λαμβάνεται από το πηνίο λήψης (receiving ή sensing coil) το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα ραβδόμορφο φερρίτη και βρίσκεται ανάμεσα στα στελέχη του ηλεκτρομαγνήτη. Ο ραβδόμορφος φερρίτης έχει τη δυνατότητα να μετακινείται κατ' ύψος και να προσαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δείγματος [11-23].

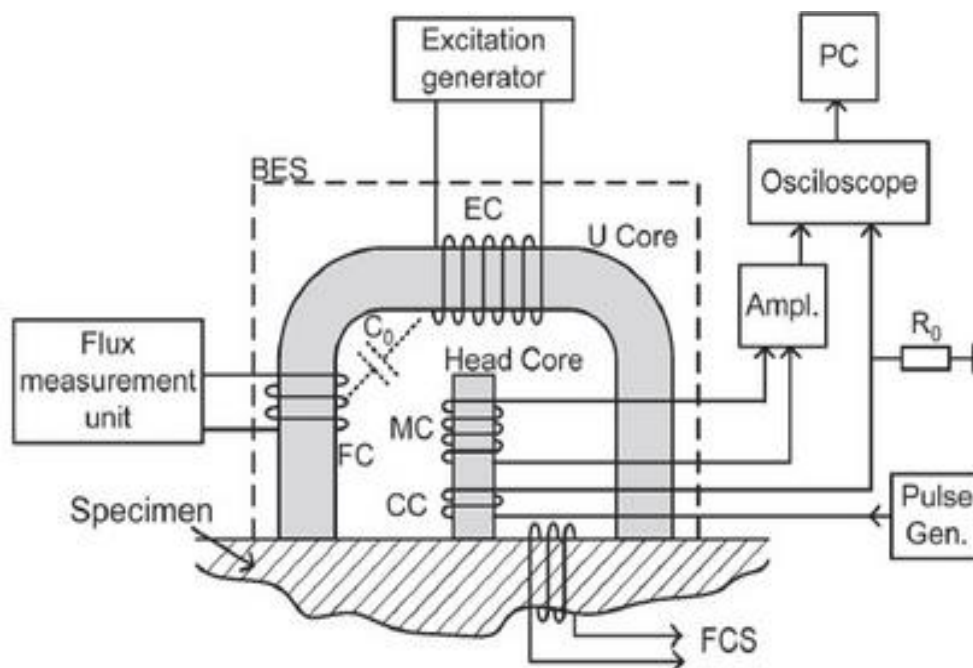


Εικόνα 3-6: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο μιας σημειακής ενδεικτικής μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινη κυματομορφή) στη επιφάνεια συγκολλημένου δείγματος.

Τα σήμα στο πηνίο λήψης, ενισχύεται και λαμβάνεται από μια κάρτα συλλογής δεδομένων. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων από κατάλληλο λογισμικό σε περιβάλλον LabView λαμβάνονται τρεις χαρακτηριστικές παράμετροι του θορύβου:

1. Ο αριθμός των παλμών του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (counts) πάνω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι δυναμικού (threshold),
2. Η ενεργός τιμή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ($MBN_{RMS} = V1$),
3. Η ένδειξη της ποιότητας επαφής του αισθητήρα με την επιφάνεια του δείγματος (V2)

Στην εικόνα 3-7 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.



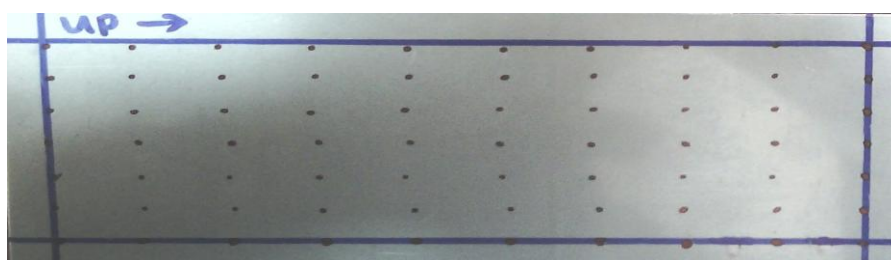
Εικόνα 3-7: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

3.4.1.2 Τρόποι μέτρησης της απόκρισης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Με τη χρήση της μεθόδου του μαγνητικού θορύβου Barkhausen, πραγματοποιήθηκαν τόσο γραμμικές όσο και γωνιακές σημειακές μετρήσεις.

3.4.1.2.1 Γραμμικές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Για τη λήψη γραμμικών σημειακών μετρήσεων, απαιτείται ο προσδιορισμός, στην επιφάνεια των συγκολλημένων δοκιμίων, των σημείων μέτρησης του θορύβου [12-23]. Στην εικόνα 3-8 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα σημεία μέτρησης στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος.



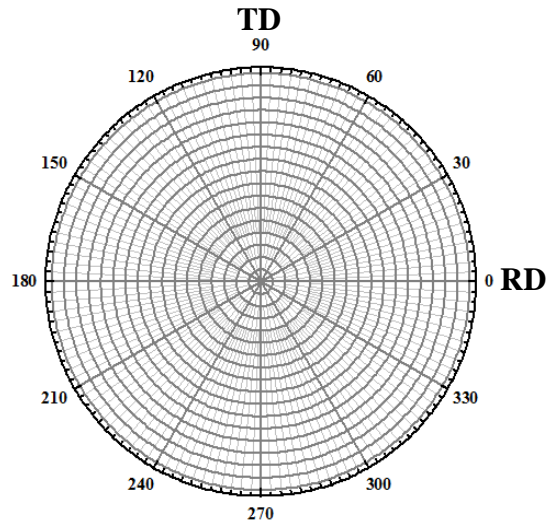
Εικόνα 3-8: Σημεία γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος.

Στη συνέχεια το πεδίο μαγνήτισης εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, δηλ. ο μαγνητικός αισθητήρας τοποθετούνταν κάθετα στη διεύθυνση της συγκόλλησης σε κάθε σημείο μέτρησης.

Μέσω των γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου προσδιορίστηκε η χωρική κατανομή, των διαφόρων μετρήσιμων παραμέτρων του, στην επιφάνεια των δειγμάτων από την οποία εξήχθησαν σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αξιοπιστία και καταλληλότητα της συγκόλλησης καθώς επίσης και για τη μικροδομική-μορφολογική ομοιογένεια της κρυσταλλικής δομής και των διακυμάνσεων των τιμών της μικροσκληρότητας στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης.

3.4.1.2.1 Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Σε αντίθεση με τις γραμμικές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στις οποίες απαιτείται η βηματική μετακίνηση του ηλεκτρομαγνήτη, οι γωνιακές μετρήσεις απαιτούν την περιστροφή του ηλεκτρομαγνήτη από 0ο έως 360° με βήμα 15°. Μέσω των γωνιακών μετρήσεων αξιολογείται η μαγνητική ανισοτροπία των συγκολλημένων δοκιμίων. Σε κάθε γωνιακή θέση, ελήφθησαν πέντε μαγνητικές αποκρίσεις και μέσος όρος τους απεικονίζονταν σε πολικές γραφικές παραστάσεις, ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης (εικόνα 3-9).



Εικόνα 3-9: Πολικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης.

Η μαγνητική απόκριση των γωνιακών μετρήσεων του θορύβου ανέδειξε, μακροσκοπικά, τον άξονα της μαγνητικής ανισοτροπίας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης [24-35].

3.4.2 Βρόχοι μαγνητικής υστέρησης

3.4.2.1 Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου

Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων του βρόχου υστέρησης στα συγκολλημένα δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας (εικόνα 3-10).

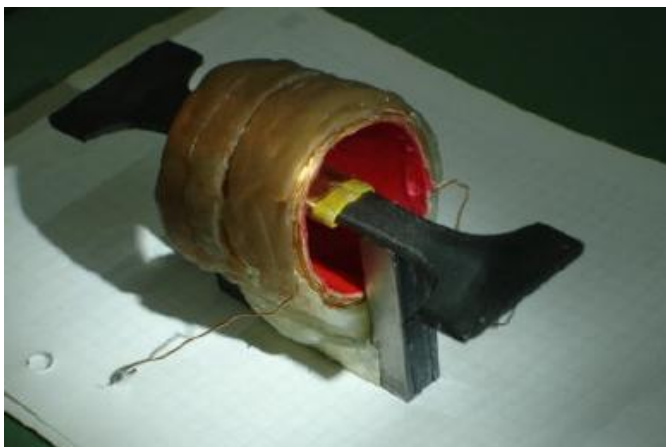


Εικόνα 3-10: Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Η διάταξη αυτή πρέπει να είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η

διάταξη δεν έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς, για τα οποία οι ιδιότητές τους είναι γνωστές και πιστοποιημένες. Για το λόγο αυτό, οι άξονες στις γραφικές παραστάσεις δεν περιγράφονται από τις μονάδες μέτρησης των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών.

Η αρχή λειτουργίας της διάταξης στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει είτε το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα (εικόνα 3-11). Έτσι το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα, με τον ηλεκτρομαγνήτη (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος [11].



Εικόνα 3-11: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Με τον τρόπο αυτό, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο προς εξέταση υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Ακόμη, η ημιτονοειδής κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

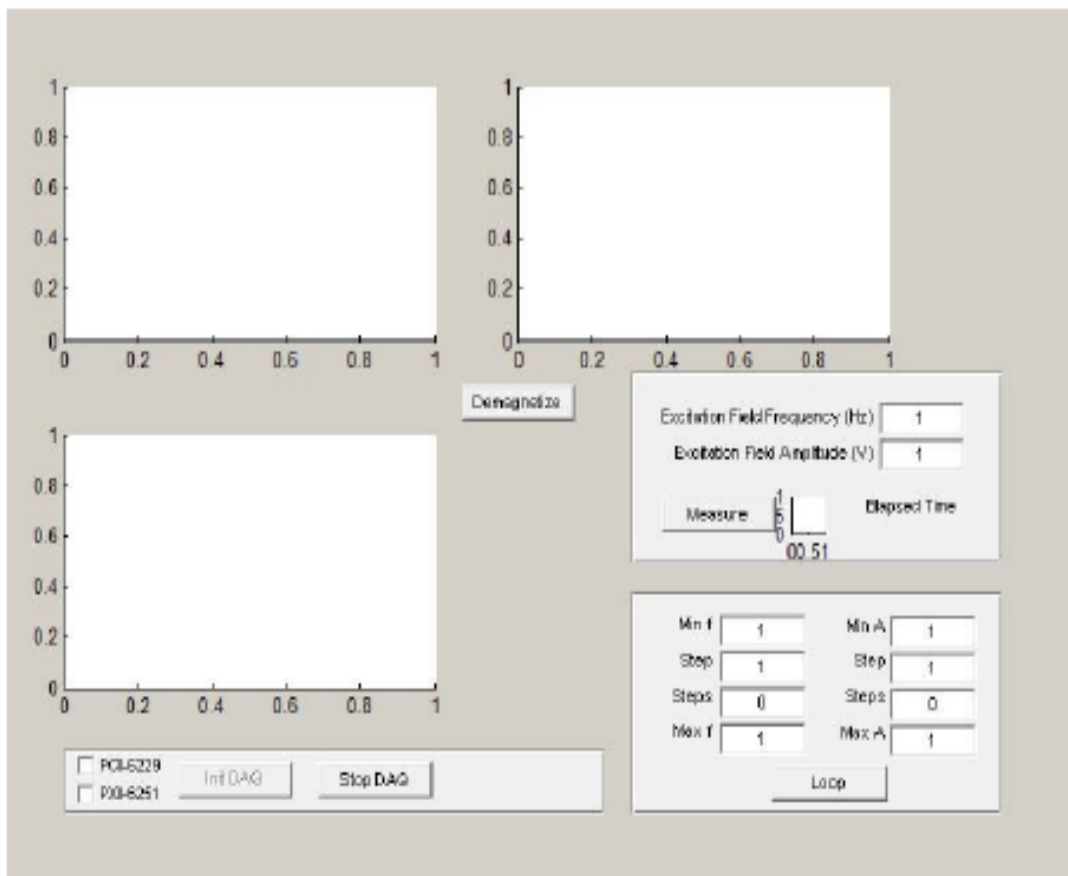
Το μαγνητικό κύκλωμα της διάταξης αποτελείται από:

- το υπό δοκιμή υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και
- τα πηνία διέγερσης και λήψης τα οποία είναι τοποθετημένα στον άξονα του υπό δοκιμή υλικού

Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα παρακάτω συστήματα που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή:

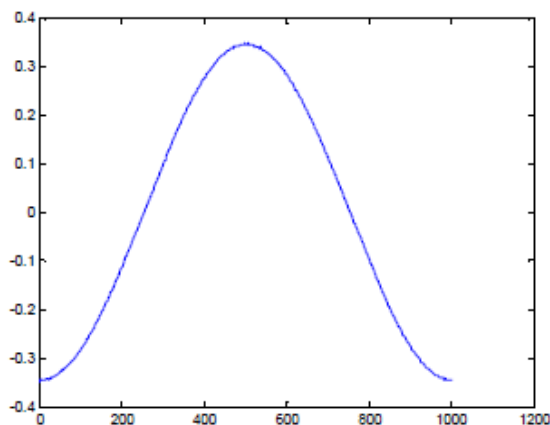
- Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter).
- Διπολικό τροφοδοτικό ισχύος- ενισχυτή σήματος και διέγερσης ρεύματος με χαρακτηριστικά $\pm 70V$, $\pm 6A$ της Kerco

Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για τον συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται στην εικόνα 3-12.



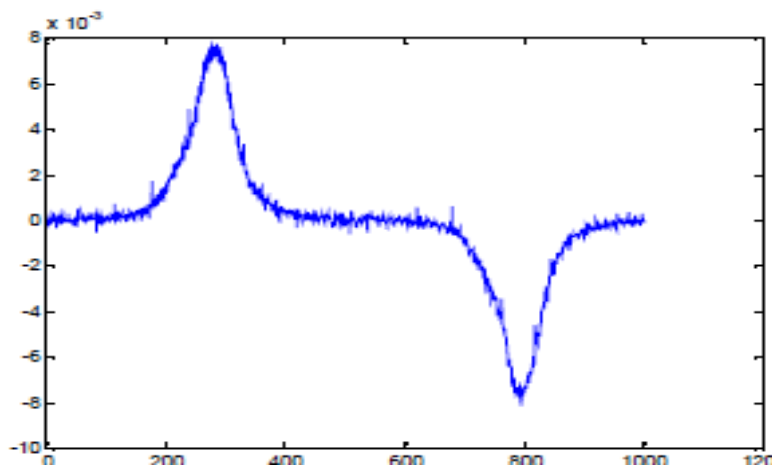
Εικόνα 3-12: Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Το σήμα διέγερσης (εικόνα 3-13) δημιουργείται από τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης του Matlab. Μέσω της πλατφόρμας αλληλεπίδρασης δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη να επιλέξει τις επιθυμητές τιμές του πλάτους και της συχνότητας του σήματος διέγερσης, ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.



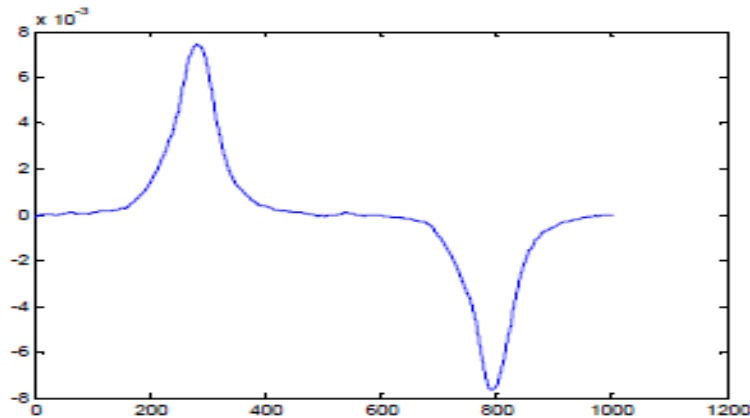
Εικόνα 3-13: Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης στις διάταξης του υστερησιογράφου.

Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης, ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (εικόνα 3-14).



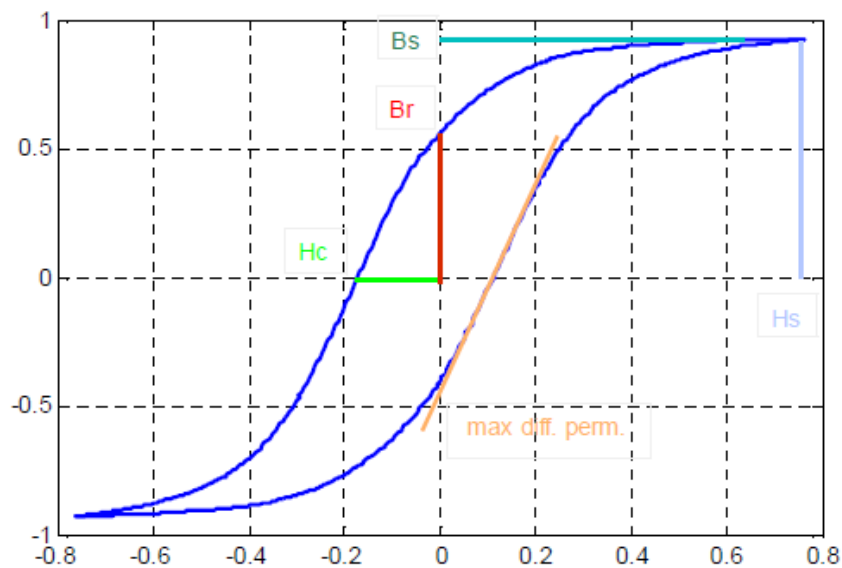
Εικόνα 3-14: Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στις διάταξης του υστερησιογράφου.

Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης, και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υπιπερατό φιλτράρισμα των σημάτων (εικόνα 15) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (εικόνα 3-16).



Εικόνα 3-15: Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.

Το λογισμικό διαθέτει υπορουτίνα με την οποία γίνεται η απομαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος διεγείροντάς το με ημιτονοειδές σήμα συνεχώς μειούμενου πλάτους. Τέλος το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων με μεταβολή της συχνότητας ή του πλάτους του σήματος, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης της απαραίτητης απομαγνήτισης σε κάθε βήμα ξεχωριστά.



Εικόνα 3-16: Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού.

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων (εικόνα 3-13, 3-15, 3-16) που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον προκύπτοντα βρόχο υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (εικόνα 3-16) προσδιορίζονται και οι παράμετροι των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού [11, 35-38].

3.5 Προσδιορισμός κατανομής παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα δοκίμια

3.5.1 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Αρχικά διαμορφώθηκαν δοκίμια εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 10002-1:2001. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σταδιακές δυναμικές εφελκυστικές και θλιπτικές καταπονήσεις εντός της ελαστικής περιοχής, σε προεπιλεγμένα βήματα παραμορφωσιμότητας παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης. Η απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen μετρήθηκε στο gauge length του δοκιμίου εφελκυσμού και ο μέσος όρος των καταγεγραμμένων τιμών θεωρήθηκε η μαγνητική παράμετρος που αντιστοιχεί στη μετρούμενη παραμόρφωση. Για τη μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) στον αριθμό δοκιμές καταπονήσεων σε κάθε προεπιλεγμένο βήμα παραμόρφωσης και ο μέσος όρος των τιμών του μαγνητικού θορύβου αντιπροσώπευε τη μαγνητική παράμετρο της παραμόρφωσης αυτής. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών δυναμικής καταπόνησης εξήχθη η καμπύλη βαθμονόμησης.

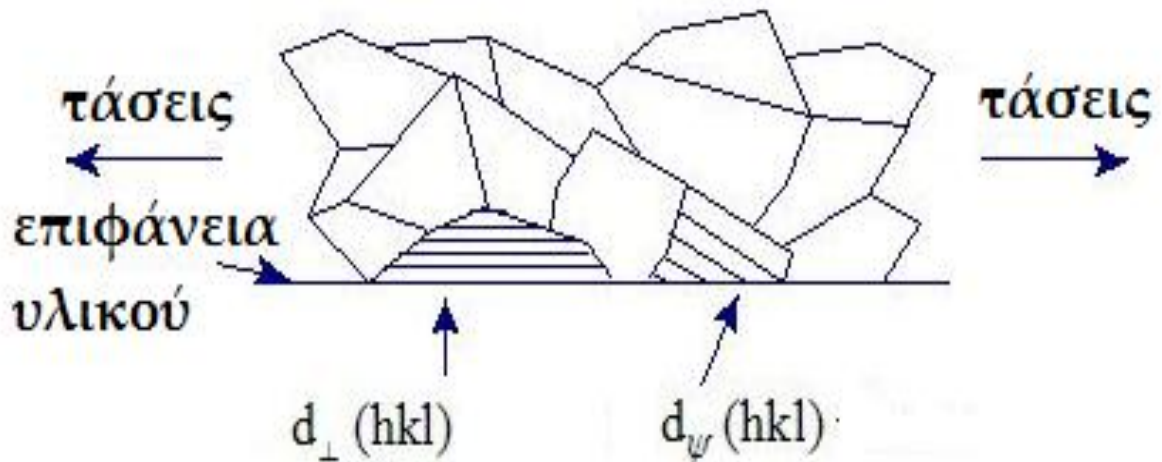
Για την εκτίμηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα δοκίμια, πραγματοποιήθηκαν μαγνητικές μετρήσεις σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων. Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των μετρήσιμων τιμών του μαγνητικού θορύβου με την τιμή της παραμένουσας τάσης.

3.5.2 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD)

Για την επαλήθευση των παραπάνω μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο XRD, σε κάθε ζώνη συγκόλλησης σε διάφορα σημεία της επιφάνειας των συγκολλημένων δοκιμίων.

Με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X μετράται η παραμόρφωση που υφίσταται το κρυσταλλικό πλέγμα εξαιτίας της ύπαρξης των τάσεων και στη συνέχεια, οι παραμένουσες τάσεις υπολογίζονται με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών τύπων από τη θεωρία της ελαστικότητας. Οι παραμένουσες τάσεις που υπολογίζονται αφορούν μόνο τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (hkl) που βρίσκονται στην επιφάνεια του δείγματος (εικόνα 3-17). Για να μπορέσουν να προσδιοριστούν οι τάσεις είναι αναγκαία η μέτρηση της

ενδοατομικής απόστασης d , για δύο τουλάχιστον γνωστούς προσανατολισμούς, σε σχέση με την επιφάνεια του δείγματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται $d\text{-sin}^2 \psi$.

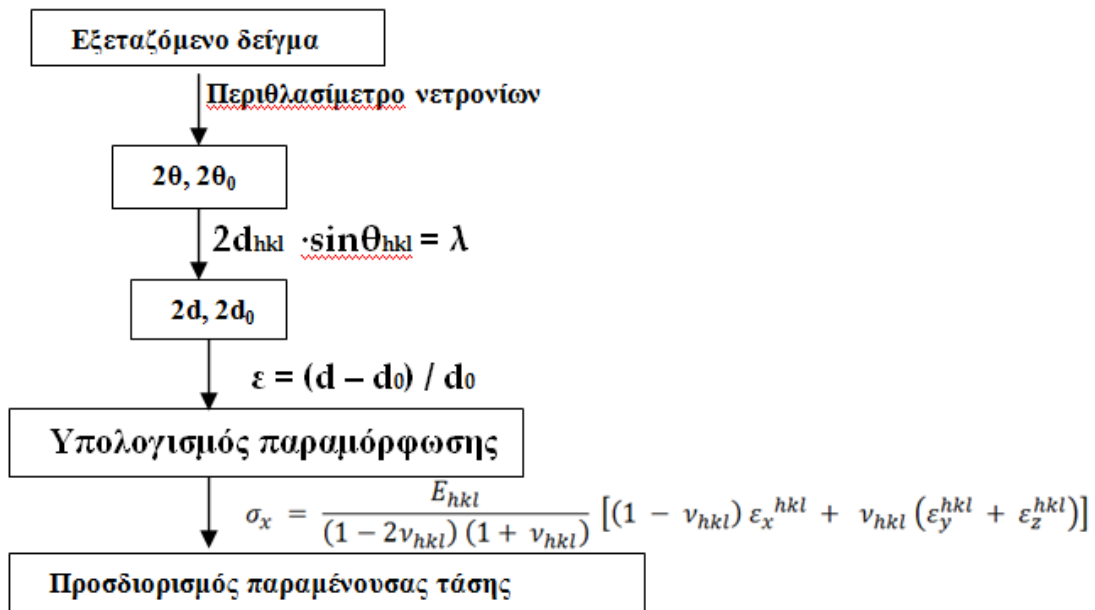


Εικόνα 3-17: Κρυσταλλογραφικά επίπεδα στην επιφάνεια πολυκρυσταλλικού υλικού.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Από κάθε συγκολλημένο δείγμα κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής αντιπροσωπευτικά των ζωνών συγκόλλησης δείγματα. Καθένα από τα δείγματα αυτά προετοιμάστηκε κατάλληλα (λείανση σε χαρτί SiC 800 και 1200 grit) ώστε η επιφάνειά του να είναι όσο το δυνατό πιο λεία. Εν συνεχεία, το καθένα από αυτά τα δείγματα τοποθετήθηκε σε κατάλληλο υποδοχέα στο περιθλασίμετρο ακτίνων X. Η σάρωση του (220) κρυσταλλογραφικού επιπέδου πραγματοποιήθηκε για ένα εύρος γωνιών ψ από -35° έως $+35^\circ$. Για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων χρειάζονται οι εξής παράμετροι: το μέτρο ελαστικότητας E που είναι ίσος με 209 MPa και ο λόγος Poisson που είναι ίσος με $\nu = 0,33$. Να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός του συντελεστή E πραγματοποιήθηκε από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του βασικού μετάλλου και όχι από βιβλιογραφικές αναφορές.

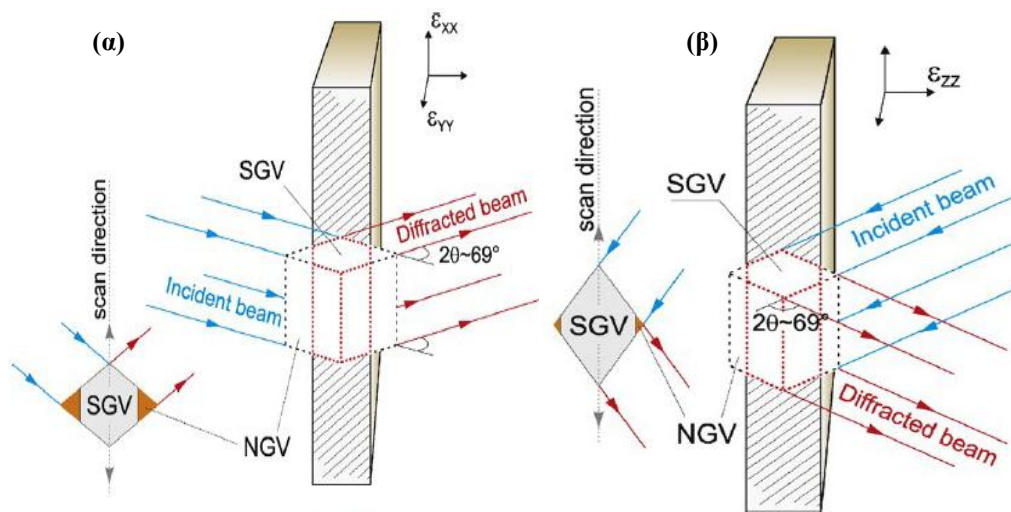
3.5.3 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων

Όπως και στην περίπτωση της περίθλασης ακτίνων X, έτσι και στην περίπτωση της περίθλασης νετρονίων, ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων δεν είναι άμεσος. Οι παραμορφώσεις που υφίστανται στο κρυσταλλικό πλέγμα εξάγονται από τις μετρήσεις στην επιφάνεια ενός πολυκρυσταλλικού υλικού. Στη συνέχεια, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών σχέσεων (εικόνα 3-18).



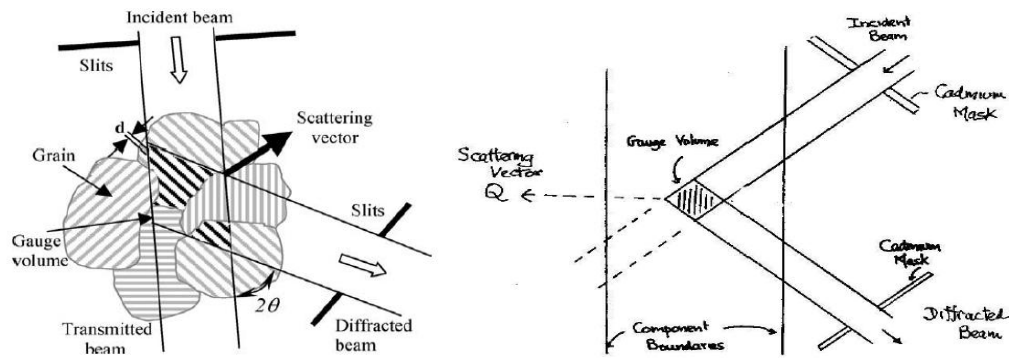
Εικόνα 3-18: Προσδιορισμός παραμένουσων τάσεων με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας νετρονίων.

Με την τεχνική της περίθλασης των νετρονίων μπορούν να προσδιοριστούν οι παραμένουσες τάσεις και στις τρεις διαστάσεις.



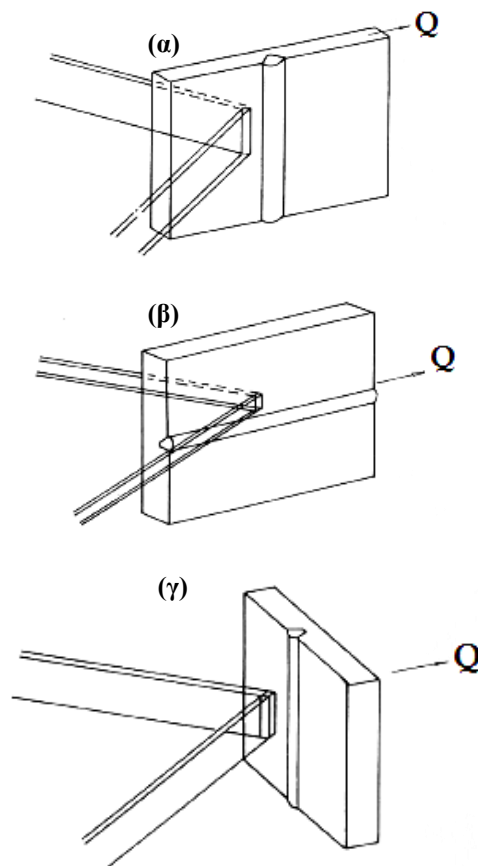
Εικόνα 3-19: (α) Γεωμετρία διέλευσης για τον προσδιορισμό της εγκάρσιας (transversal) και διαμήκουσ (longitudinal) παραμόρφωσης και (β) Γεωμετρία ανάκλασης για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων κάθετα στην επιφάνεια του δείγματος. Για την μέτρηση των άνωθεν αναφερόμενων παραμορφώσεων, μελετάται διαφορετικός όγκος υλικού (Sample Gauge Volume).

Σε κάθε μέτρηση που πραγματοποιείται με το περιθλασίμετρο νετρονίων, προσδιορίζεται η συνιστώσα της παραμόρφωσης του πλέγματος που είναι παράλληλα στο διάνυσμα της σκέδασης Q (scattering vector), το οποίο είναι κάθετο στην ανακλώμενα κρυσταλλογραφικά επίπεδα.



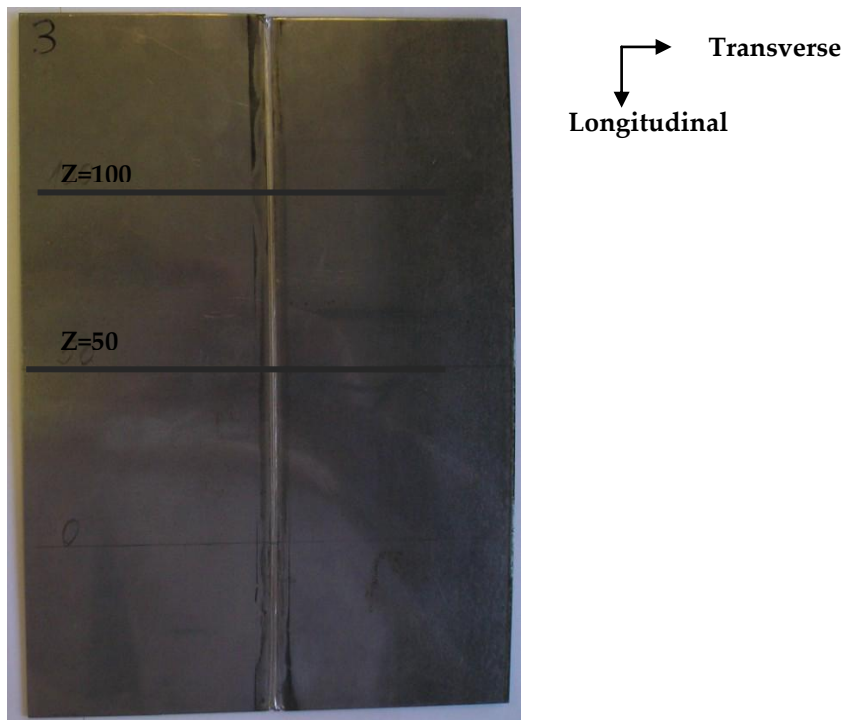
Εικόνα 3-20: Προσδιορισμός του διανύσματος σκέδασης, Q .

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, το δείγμα κινείται βήμα προς βήμα προς μία κατεύθυνση και το αντίστοιχο φάσματα περίθλασης συλλέγεται από κάθε προκαθορισμένη θέση. Η σωστή περιστροφή του δείγματος σε σχέση με το διάνυσμα Q οδηγεί στη λήψη της αντίστοιχης συνιστώσας της παραμόρφωσης σε κάθε θέση. Συνεπώς, με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού των παραμορφώσεων και των τάσεων που είναι παράλληλες κάθε φορά στο διάνυσμα της σκέδασης Q και όχι στη διεύθυνση της ανάκλασης.



Εικόνα 3-21: Θέσεις του συγκολλημένου δείγματος ως προς την προσπίπτουσα και την ανακλώμενη δέσμη νετρονίων για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων/τάσεων (α) εγκάρσιων (transverse) στη διεύθυνση της συγκόλλησης, (β) παράλληλων (longitudinal) στη διεύθυνση της συγκόλλησης και (γ) κάθετων στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τις εξής παραμέτρους: $2\theta = 65 \text{ deg}$ που αντιστοιχεί στο (110) κρυσταλλογραφικό επίπεδο του φερρίτη, το μέτρο ελαστικότητας επιλέχθηκε ίσο με $E = 225.5 \text{ GPa}$ και ο λόγος Poisson ίσος με $\nu = 0.28$. Οι θέσεις των μετρήσεων, στο εξεταζόμενο δείγμα, παρουσιάζονται στην εικόνα 22.



Εικόνα 3-22: Θέσεις προσδιορισμού των παραμένουσων τάσεων στο συγκολλημένο δείγμα AISI 1008 με τη μέθοδο EBW. Στην ίδια εικόνα εμφανίζονται και οι διευθύνσεις όπου προσδιορίζονται οι παραμένουσες τάσεις σύμφωνα με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων.

3.6 Μεταλλογραφικός-Μικροδομικός χαρακτηρισμός των συγκολλημένων δειγμάτων

3.6.1 Απαίτηση για περαιτέρω μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό του υλικού

Από κάθε συγκολλημένο δοκίμιο, κόπηκαν με τη μέθοδο τις υδροκοπής, μικρότερα παραλληλόγραμμα δείγματα, τα οποία αντιπροσώπευαν κάθε ζώνη συγκόλλησης. Στόχος ήταν ο μικροδομικός χαρακτηρισμός της εκάστοτε ζώνης συγκόλλησης, μέσω της παρατήρησής τους στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και από την ταυτοποίηση των φάσεων από το ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X. Σκοπός της περεταίρω μελέτης του συγκολλημένου δοκιμίου ήταν η συσχέτιση της μικροδομής με τις μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων του δείγματος.

Στον πίνακα 3-5 αναφέρονται οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να ολοκληρωθεί η προετοιμασία για το μικροδομικό χαρακτηρισμό του υλικού.

Πίνακας 3-3: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν με στόχο το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό.

# Δείγματος	Χαρακτηρισμός
No1	Μικροδομικός χαρακτηρισμός με τη χρήση Οπτικού Μικροσκοπίου (Optical Microscopy, OM).
No2	Μικροδομικός χαρακτηρισμός με τη χρήση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM).
No3	Ταυτοποίηση φάσεων και προσδιορισμός κρυσταλλογραφικού ιστού (μακρο-ιστού, macrotexture) με τη χρήση Περιθλασιμετρίας Αντίνων Χ (X-ray Diffraction Pattern, XRD).

Η επιφάνεια των δοκιμίων No1, No2 και No3 χρειάζεται να προετοιμαστεί κατάλληλα ώστε να εξαλειφθούν οι αρχικές επιφανειακές ανωμαλίες και να αποκαλυφθούν τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

3.6.2 Προετοιμασία δειγμάτων

Πριν τη μελέτη ενός δοκιμίου πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειάς του, η οποία σε πρώτη φάση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες και σε δεύτερη φάση αποκαλύπτει τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το υλικό. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας είναι η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και η χημική προσβολή.

3.6.2.1 Κοπή δοκιμίων

Για το λόγο αυτό, από το συγκολλημένο δοκίμιο κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής τρία μικρότερα παραλληλεπίπεδα δείγματα με στόχο τον προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των μικροδομικών χαρακτηριστικών του καθώς και το χαρακτηρισμό του μικρογραφικού ιστού του.

3.6.2.2 Εγκιβωτισμός

Για τον εγκιβωτισμό των υπό εξέταση δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin, ενώ ο σκληρυντής ήταν τύπου EpoFix Hardener. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Struers η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Για τη σωστή μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλοι δοσομετρικοί σωλήνες που υπήρχαν μέσα στη συσκευασία και για την ανάμειξή του, το μίγμα αναδεύτηκε για 2min προσεκτικά για την αποφυγή σχηματισμού φυσαλίδων. Παράλληλα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο κέντρο πρότυπων κυλινδρικών καλουπιών της Struers και στη συνέχεια συμπληρώθηκε το μίγμα σκληρυντή – ρητίνης.

3.6.2.3 Λείανση

Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ενώ ταυτόχρονα κατά τη λείανση χρησιμοποιείται νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου, όσο και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in²). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην πίεση του δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί, καθώς χρειαζόνταν να είναι ομοιόμορφη και όσο αυτό ήταν δυνατό, ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο λείανσης, όπου αλλάζει το λειαντικό χαρτί, η λείανση πραγματοποιούνταν σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της προηγούμενης.

3.6.2.4 Στίλβωση

Τη λείανση ακολούθησε η στίλβωση των δειγμάτων με σκοπό την εξάλειψη των ιχνών (γραμμές) από τη μηχανική λείανση προκειμένου η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου από κατάλληλο τσόχινο ύφασμα αντίστοιχο κάθε φορά της αδαμαντόπαστας που χρησιμοποιούνταν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια με αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 3μm και στη συνέχεια 1μm. Σε όλη τη διάρκεια της στίλβωσης συμπληρώνονταν στην επιφάνεια του τσόχινου υφάσματος λιπαντικό για την ψύξη των δοκιμίων. Με το πέρας κάθε βήματος το δείγμα ξεπλένονταν σε τρεχούμενο νερό, καθαρίζονταν με βαμβάκι, στη συνέχεια με αιθανόλη και τέλος ξηραίνονταν σε ρεύμα θερμού αέρα.

3.6.2.5 Χημική προσβολή

Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του υπό εξέταση πολυκρυσταλλικού υλικού, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής του, η παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων στην επιφάνειά του και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των κόκκων που το αποτελούν, είναι απαραίτητη η επιλεκτική διάβρωση των ορίων των κόκκων (etching). Ουσιαστικά, η επιφάνεια του δείγματος διαβρέχεται από ένα ισχυρά όξινο διάλυμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα η χημική προσβολή της επιφάνειας του δείγματος γίνεται με Nital 2% για 20sec σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια ακολουθεί έκπλυση του δείγματος με αιθανόλη.

Στον πίνακα 3-4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια της προετοιμασίας του εκάστοτε δείγματος.

Πίνακας 3-4: Στάδια προετοιμασίας υλικού αναφοράς για το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό.

# Δείγματος		No1	No2	No3
Τεχνική δομικού χαρακτηρισμού		OM	SEM	XRD
Στάδια προετοιμασίας	Κοπή (Cutting)	Υδροκοπή		
	Εγκιβωτισμός (Mounting)	-	-	-
	Λείανση (Grinding)	Πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα στον περιστρεφόμενο κυκλικό δίσκο λείανσης της σχολής MMM, ενώ ταυτόχρονα ρινίσματα απομακρύνονταν με τη ρίψη νερού. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in ²).		Ομοίως με τα δείγματα No1 & No2, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά SiC με 800 grit.
	Στίλβωση (Polishing)	Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σταδιακά με αδαμαντόπαστα 3μm και 1μm.		-
	Χημική προσβολή (Chemical Etching)	Nital 2% (=A ιθανόλη 98ml + Νιτρικό Οξύ 2ml)		-

3.6.3 Μέθοδοι Μικροδομικού χαρακτηρισμού

3.6.3.1 Οπτικό Μικροσκόπιο (OM)

Για την οπτική μεταλλογραφία χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός OLYMPUS BX41-M (εικόνα 23) για την παρατήρηση και ερμηνεία της μικροδομής του υλικού. Η μεγέθυνση ήταν x50. Χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή NIKON για τη λήψη φωτογραφιών.



Εικόνα 3-23: Οπτικό μικροσκόπιο τύπου OLYMPUS BX41-M.

3.6.3.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope) που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου Jeol GSM 6380-LV (εικόνα 24). Οι λειτουργικές συνθήκες για τη λήψη εικόνων δευτερογενών ηλεκτρονίων (secondary electronmode) καιπισσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (backscattered electronmode) δίνονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 3-5: Συνθήκες λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

<i>Συνθήκες λειτουργίας</i>	<i>SEI mode</i>	<i>BES mode</i>
<i>Accelerating voltage</i>	<i>20kV</i>	<i>20kV</i>
<i>Vacuum</i>	<i>High</i>	<i>High</i>
<i>Spot size</i>	<i>50nm</i>	<i>60nm</i>
<i>Working distance</i>	<i>15mm</i>	<i>15mm</i>

Μέσω εικόναςπισσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε η επιφάνεια και η κάθετη διατομή δείγματος AISI 1008 και ταυτοποιήθηκε, με τη χρήση αντίθεσης πεδίου, η ανάπτυξη μικρογραφικού ιστού μέσω της συμμετοχής φάσεων εντός θερμοδυναμικής ισορροπίας (προευτηκτοειδή φερρίτη, F) και μικρογραφικών συστατικών (ευτηκτοειδή περλίτη (P) με λόγο συμμετοχής πλακιδίων 7,6/1).



Εικόνα 3-24: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV.

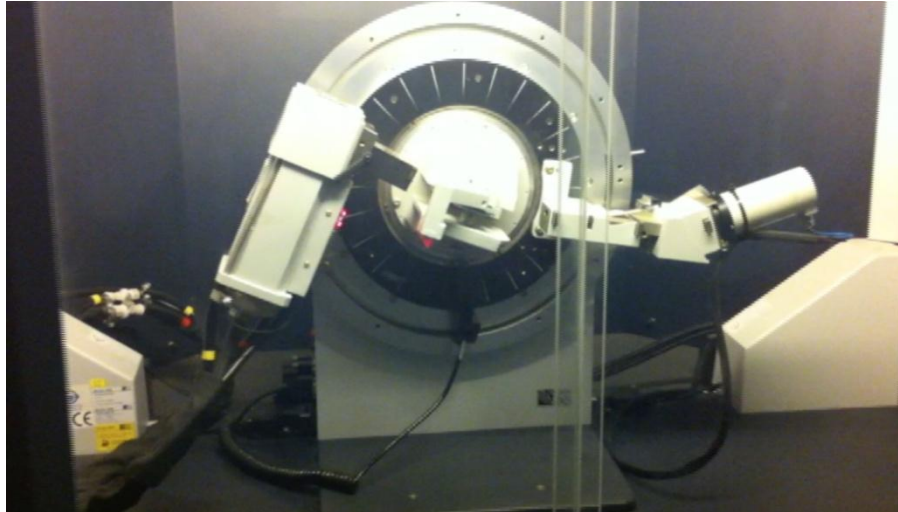
3.6.3.3 Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)

Το μικροσκόπιο ήταν εξοπλισμένο με μικροαναλυτή NoranTS 5500 και μπορούσαν να πραγματοποιηθούν παράλληλα χημικές μικροαναλύσεις για την εύρεση της ποσοστιαίας συμμετοχής των κραμματικών στοιχείων ενδοκρυσταλλικά και περικρυσταλλικά.

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης της μικροδομής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, πραγματοποιήθηκαν σημειακές και γενικευμένες χημικές στοιχειομετρικές αναλύσεις στην επιφάνεια του δείγματος από κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης τύπου Noray TS 5500 στο εσωτερικό του μικροσκοπίου. Στόχος της μικροανάλυσης ήταν η εύρεση της ποσοστιαίας συμμετοχής των κραμματικών στοιχείων ενδοκρυσταλλικά και διακρυσταλλικά. Ποσοτικός προσδιορισμός ελαφριών στοιχείων (όπως C, N, B, O) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί.

3.6.3.4 Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction)

Για τον προσδιορισμό του μακρο-κρυσταλλογραφικού ιστού (macrotecture), χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο ακτίνων X (X-ray Diffraction), τύπου Brucker D8 Focus (εικόνα 25). Το XRD έφερε λάμπα χαλκού ($\text{CuK}\alpha_1$) με ακτινοβολία $1,5405 \text{ \AA}$, δυναμικό 40KV και ένταση ρεύματος 40mA. Το βήμα σάρωσης της δέσμης ήταν $0,02^\circ$, ο χρόνος παραμονής σε κάθε μοίρα ήταν 1sec, ενώ το γωνιακό εύρος εξέτασης των δοκιμίων, μετρούμενο σε γωνία 2θ , ήταν από 30 ως 130° για όλα τα υπό εξέταση δοκίμια.



Εικόνα 3-25: Περιθλασίμετρο ακτίνων X σάρωσης (SEM) τύπου Brucker D8 Focus.

3.7 Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων

3.7.1 Απαίτηση για περαιτέρω μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αναφοράς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας με τη μέθοδο Vickers στην επιφάνεια του δείγματος, καθώς και πειράματα εφελκυσμού. Σκοπός την περαιτέρω μελέτης του συγκολλημένου δοκιμίου ήταν η συσχέτιση των μεταβολών των μηχανικών ιδιοτήτων του με τις μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων του δείγματος.

Στον πίνακα 3-6 αναφέρονται οι τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αναφοράς.

Πίνακας 3-6: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αναφοράς.

# Δείγματος	Χαρακτηρισμός
No4	Σκληρομετρήσεις
No5	Δοκιμές εφελκυσμού

3.7.1.1 Δοκιμές μακρο-σκληρομέτρησης

Για τη μέτρηση της μακρο-σκληρότητας, η επιφάνεια του υλικού είχε λειανθεί με χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου μέχρι 1200 grit. Χρησιμοποιήθηκε μακροσκληρομέτρηση με τη μέθοδο Vickers στο σκληρόμετρο του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας τύπου Karl Frane GMBH και για τη λήψη των μετρήσεων εφαρμόστηκε φορτίο 196N. Καθώς η διαμαντένια πυραμίδα γωνίας 136° διείσδυε στην επιφάνεια του δοκιμίου, άφηνε ένα ρομβοειδές αποτύπωμα. Για τη σωστή διείσδυση της διαμαντένιας πυραμίδας οι προς εξέταση επιφάνειες ήταν λείες. Πραγματοποιήθηκαν 10 μετρήσεις ανά δοκίμιο για ελαχιστοποίηση

πιθανότητας σφάλματος. Από τη μέτρηση με αναλογικό τρόπο του μέσου όρου των διαγωνίων του αποτυώματος προέκυψε η σκληρότητα του δείγματος, σύμφωνα με τους πίνακες μετατροπής της ένδειξης σε σκληρότητα.

3.7.1.2 Δοκιμές μικρο-σκληρομέτρησης

Πριν από τη μικροσκληρομέτρηση απαιτείται η λείανση και η στίλβωση των δοκιμίων. Κάθε αποτύωμα του διεισδυτή απέχει 1000 μικρά ($0,01\text{mm} = 10\mu\text{m}$) κατά τη διάμετρο του δοκιμίου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο μικροσκληρόμετρο της EAB και επιλέχθηκε φορτίο 300 g και χρόνος επιβολής πλήρους φορτίου 15 sec.

3.7.1.3 Δοκιμές εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη και πιο διαδεδομένη δοκιμή για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Ο σκοπός πραγματοποίησης των δοκιμών εφελκυσμού ήταν ο έλεγχος της μεταβλητότητας των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου δοκιμίου ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο η συγκόλληση επηρέασε τις αντοχές του αρχικού υλικού. Επίσης, οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με στόχο να συσχετιστούν η μηχανική απόκριση του συγκολλημένου δοκιμίου με τη μικρογραφική δομή του (μετασχηματισμούς φάσεων για τον εκάστοτε θερμικό κύκλο) και το αναπτυσσόμενο τασικό πεδίο.

Η μηχανική δοκιμή πραγματοποιήθηκε παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης με συσκευή τύπου Instron – Model 4482. Η ταχύτητα εφελκυσμού που ορίστηκε στη μηχανή εφελκυσμού για όλες τις δοκιμές ήταν 3 mm/min. Μετά το τέλος της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης από την οποία προσδιορίστηκαν προσεγγιστικά οι τιμές του ορίου διαρροής (Yield Point), της μέγιστης εφελκυστικής τάσης θραύσης (Ultimate Tensile Strength) και της ολκιμότητας (Elongation).

Επίσης πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη των θραυσιγενών επιφανειών του αρχικού δείγματος και του συγκολλημένου, ώστε να παρατηρηθεί ο τύπος της θραύσης (όλκιμης ή/και ψαθυρής) και στις δύο περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέρχονται από την εφαρμογή των μαγνητικών μη-καταστροφικών μεθόδων (Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen και βρόχος υστέρησης) στο συγκολλημένο δοκίμιο. Επίσης παρατίθενται αποτελέσματα που προέρχονται από το δομικό και μικροδομικό χαρακτηρισμό του δείγματος, καθώς και οι διακυμάνσεις των κύριων μηχανικών ιδιοτήτων του. Στόχος είναι η συσχέτιση των μεταβολών του υφίστανται τα συγκολλητά μεταλλικά μέρη με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην επιφάνεια του υπό εξέταση δείγματος.

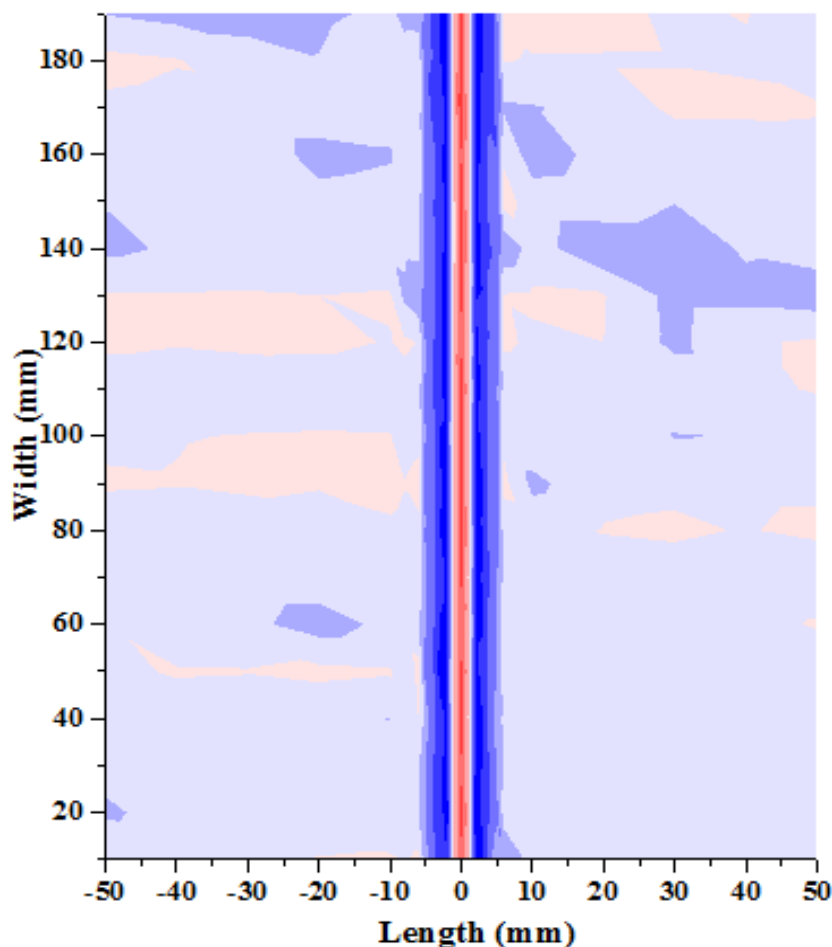
4.2 Οπτικός έλεγχος συγκολλημένων δοκιμίων

Μετά την ολοκλήρωση των συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος των συγκολλημένων δοκιμίων. Σε καμία από τις συγκολλήσεις δεν ανιχνεύθηκαν σφάλματα (weld defects) όπως π.χ. επιφανειακές ατέλειες (π.χ. ρωγμές) ή παραμορφώσεις (distortions) που σχετίζονται είτε με την εγκάρσια (transverse shrinkage) ή διαμήκη (longitudinal shrinkage) συστολή των δοκιμίων ως προς τον άξονα της συγκόλλησης, είτε με τη γωνιώδη μεταβολή-περιστροφή γύρω από τον άξονα της συγκόλλησης (angular change) λόγω ανομοιομορφης θερμοκρασιακής κατανομής κατά το πάχος των ελασμάτων, είτε τέλος με το λυγισμό (buckling distortion) των ελασμάτων.

4.3 Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων

4.3.1 Χωρική κατανομή των γραμμικών σημειακών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

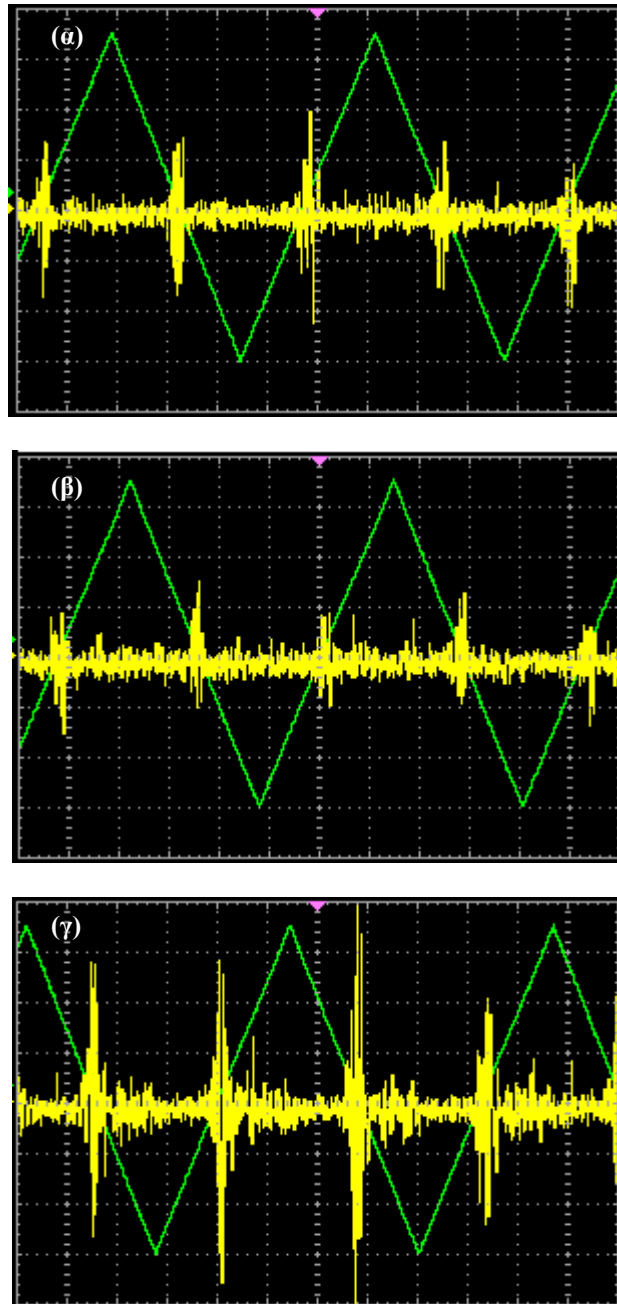
Για τη μέτρηση της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου (MBN_{rms}), το πεδίο μαγνήτισης εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, δηλαδή παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Η απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 παρουσιάζεται στην εικόνα 4-1. Με βάση το χρωματικό κώδικα, οι κόκκινες περιοχές υποδεικνύουν τις περιοχές του συγκολλημένου δοκιμίου με τις υψηλότερες τιμές MBN_{rms}, ενώ με σκούρο μπλε τις περιοχές όπου η μαγνητική απόκριση λαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές. Οι ενδιάμεσες τιμές της μαγνητικής απόκρισης παρουσιάζονται με ανοιχτό μπλε χρώμα.



Εικόνα 4-1: Απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στο συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με EBW ως μέθοδο συγκόλλησης, όταν το πεδίο εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης.

Σημαντικές διακυμάνσεις των τιμών MBN_{rms} παρατηρήθηκαν την επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος. Είναι σαφές ότι ο μαγνητικός θόρυβος παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του στη ζώνη τήξης, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή κοντά στο κέντρο της συγκόλλησης. Η μαγνητική απόκριση μειώνεται ταχύτατα με την αύξηση της απόστασης από τη ζώνη αυτή. Οι χαμηλότερες τιμές της εμφανίζονται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Ωστόσο, το μαγνητικό σήμα ήταν ελαφρώς ενισχυμένο στο μέταλλο βάσης, χωρίς να υπερβαίνει τις μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν στη ζώνη τήξης.

Οι κυματομορφές του μαγνητικού θορύβου ελήφθησαν από τον ψηφιακό παλμογράφο του εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλογνωσίας (τύπου EZ Digital Oscilloscope DS-1530). Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται η μορφή που λαμβάνει ο μαγνητικός θόρυβος σε κάθε ζώνη συγκόλλησης. Να σημειωθεί ότι, το πεδίο εφαρμόζονταν, μέσω του αισθητήρα, παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 4-2: Μορφή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινο χρώμα) από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Είναι γνωστό, ότι η μορφή του θορύβου, αποτελεί μια ποιοτική ένδειξη τόσο της ύπαρξης, όσο και του είδους (εφελκυστικών ή θλιπτικών) των παραμενουσών τάσεων που υπάρχουν στο σημείο της μέτρησης. Συγκεκριμένα, σε ένα θετικά μαγνητοσυστολικό υλικό, οι εφελκυστικές τάσεις αυξάνουν την ένταση του μαγνητικού θορύβου, ενώ με τη σειρά τους οι θλιπτικές των μειώνουν. Ως εκ τούτου, οι κυματομορφές που παρουσιάζονται στην εικόνα 4-2, υποδεικνύουν την παρουσία εφελκυστικών τάσεων στη ζώνη τήξης και θλιπτικών τάσεων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

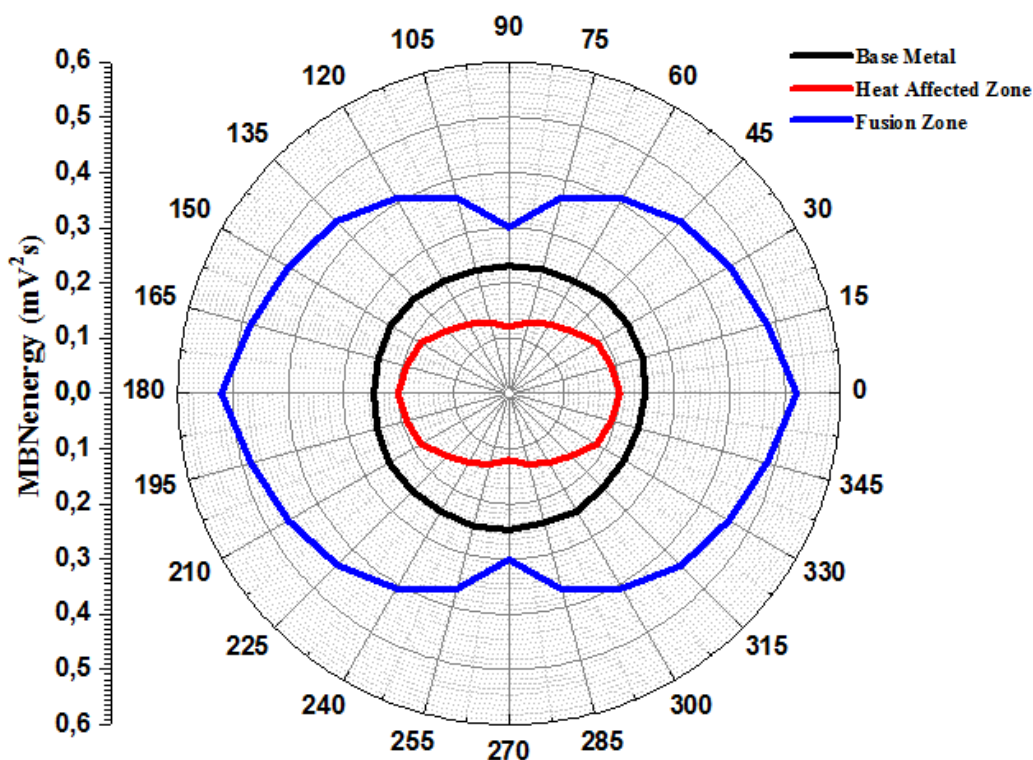
4.3.2 Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Η παράμετρος του μαγνητικού θορύβου που μετρήθηκε ώστε να εκτιμηθεί η μαγνητική ανισοτροπία της εκάστοτε ζώνη συγκόλλησης σε όλα τα συγκολλημένα δοκίμια είναι η ενέργεια του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (MBNenergy).

$$\text{MBNenergy} = a \cos^2(\theta + \Phi) + \beta$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ του εφαρμοζόμενου πεδίου και της διεύθυνσης της εφαρμοζόμενης τάσης και a , Φ , β είναι προσεγγιστικές παράμετροι του τελικού γραφήματος. Η παράμετρος a αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα που χαρακτηρίζει την ανισότροπη συμπεριφορά της γωνιακής μαγνητικής εξάρτησης. Η ανισότροπη συμπεριφορά προέρχεται από τη συνεισφορά του συνόλου των 180° - μαγνητικών τοιχωμάτων στον προσδιορισμό της γωνίας του εύκολου άξονα μαγνήτισης. Αντίθετα, η παράμετρος β αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα που χαρακτηρίζει την ισότροπη συμπεριφορά της γωνιακής μαγνητικής εξάρτησης.

Στην εικόνα 4-3 παρουσιάζονται ενδεικτικά πολικά διαγράμματα της γωνιακής εξάρτησης του μαγνητικού θορύβου με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο για κάθε ζώνη συγκόλλησης.



Εικόνα 4-3: Ενδεικτικά πολικά διαγράμματα όπου απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης στο βασικό μέταλλο (Base Metal), στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone) και στη ζώνη τήξης (Fusion Zone).

Γωνία των 90° αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι στη ζώνη τήξης παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου, ενώ αντίστοιχα, η ελάχιστη παρατηρείται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Αυτό οφείλεται στην παρουσία εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων αντίστοιχα.

Γίνεται αμέσως αντιληπτό, ότι ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη και η ζώνη τήξης παρουσιάζουν τον, μακροσκοπικά, εύκολο άξονα μαγνήτισής τους στις 0° , το μέταλλο βάσης παρουσιάζει τον άξονα αυτό στις 15° περίπου. Η ανισοτροπική αυτή συμπεριφορά οφείλεται στο ονομαζόμενο μαγνητο-ελαστικό φαινόμενο (magneto-elastic effect).

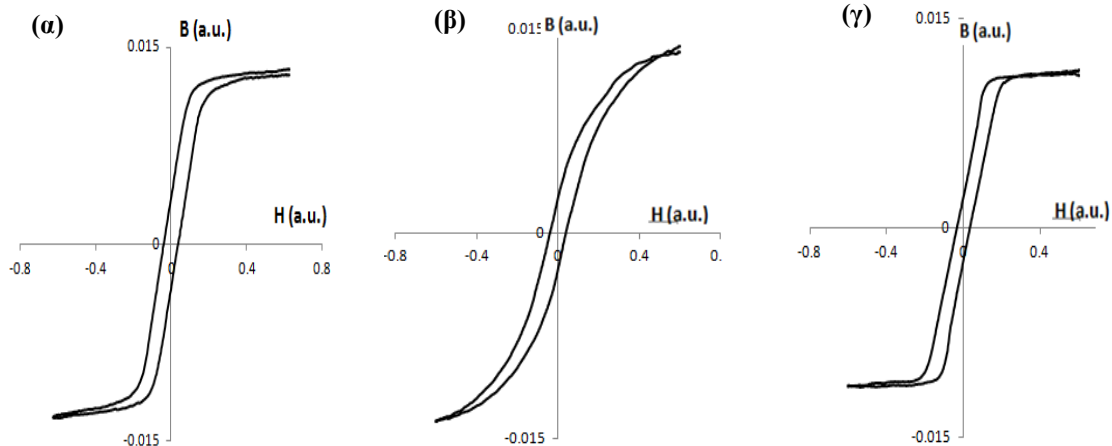
Ο χάλυβας, χαρακτηρίζεται ως θερμικά μαγνητοσυστολικός ($\lambda_{si} > 0$) για χαμηλές τιμές εφαρμοζόμενου πεδίου. Ο εύκολος άξονας μαγνήτισης παρατηρείται, εν γένει, στην οικογένεια των $\langle 100 \rangle$ κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Η παρουσία τάσεων, είτε λόγω στατικής/δυναμικής καταπόνησης (π.χ. εφελκυσμός/κόπωση αντίστοιχα), είτε λόγω κάποιας θερμικής κατεργασίας (ανόπτηση, συγκόλληση), αναγκάζει τη διάταξη των μαγνητικών περιοχών να ανακατανεμηθεί, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική ενέργεια του μεταλλικού συστήματος (κυρίως η μαγνητοελαστική ενέργεια και η ενέργεια ανισοτροπίας). Η νέα αυτή διάταξη των μαγνητικών περιοχών προκύπτει είτε (α) με τον επαναπροσανατολισμό των διανυσμάτων της μαγνήτισης των μαγνητικών διπόλων, που περιγράφουν τις μαγνητικές περιοχές, όταν η διεύθυνσή τους διαφέρει από τη διεύθυνση της τάσης, είτε (β) Με την αύξηση των 180° μαγνητικών τοιχωμάτων. Γνωρίζουμε ότι, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση όπου ο αριθμός των 180° - μαγνητικών τοιχωμάτων είναι μέγιστος. Θεωρώντας τον εύκολο άξονα μαγνήτισης που περιγράφει την κατάσταση όπου καμία τάση δεν επενεργεί στο υλικό (initial easy magnetization axis) αποκλίνει από τη διεύθυνση των τάσεων που παρατηρούνται στη συνέχεια, συμπεραίνουμε ότι στην κατάσταση όπου εμφανίζονται τάσεις στο υλικό, ο αρχικός εύκολος άξονας μαγνήτισης θα περιστραφεί, προσεγγίζοντας τη διεύθυνση των τάσεων.

4.3.3 Μέτρηση βρόχων υστέρησης

Στην εικόνα 4-4 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αποκρίσεις μαγνητικών βρόχων υστέρησης την εκάστοτε ζώνη τη συγκόλλησης. Να σημειωθεί ότι, για να λάβουμε τους βρόχους, κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικές διατάξεις πηνίων διέγερσης και λήψης, καθώς οι γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμίων που αντιπροσώπευαν κάθε ζώνη της

συγκόλλησης ήταν διαφορετικές. Οι παράμετροι για τη μέτρηση των βρόχων ήταν: $f=0.1\text{Hz}$ και $V=1\text{Volt}$.

Αν και οι άξονες δεν είναι βαθμονομημένοι, μπορούμε να εξάγουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τη μεταβολή των διαφόρων μαγνητικών μεγεθών, όπως η μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) και το συνεκτικό πεδίο (H_c).

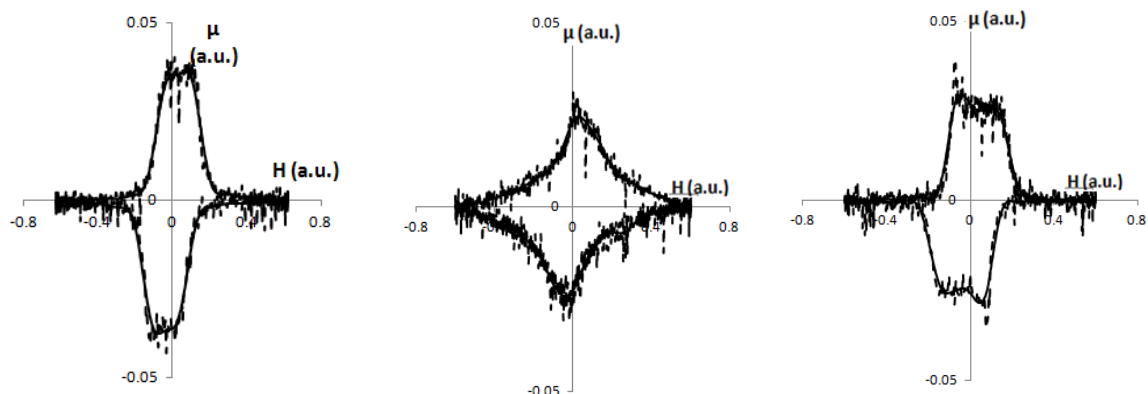


Εικόνα 4-4 : Μορφή των ελασσόνων βρόχων υστέρησης από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Παρατηρούμε, ότι ως προς το βρόχο υστέρησης του μετάλλου βάσης, η μορφή των βρόχων μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα η παρουσία εφελκυστικών τάσεων στη ζώνη τήξης αυξάνει την κλίση του βρόχου (αυξάνει η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού), οδηγώντας στην αύξηση της τιμής της παραμένουσας μαγνήτισης, ενώ αντίστοιχα μειώνεται το συνεκτικό πεδίο. Οι παραπάνω μεταβολές δεικνύουν ότι κατά τη μαγνητική μέτρηση, το πεδίο εφαρμόζονταν παράλληλα με τη διεύθυνση των τάσεων.

Αντίστοιχα, στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, η κλίση του βρόχου υστέρησης μειώνεται ενώ το συνεκτικό πεδίο αυξάνεται. Παρατηρείται ωστόσο, μια «ομαλοποίηση» της καμπυλότητας του μαγνητικού βρόχου.

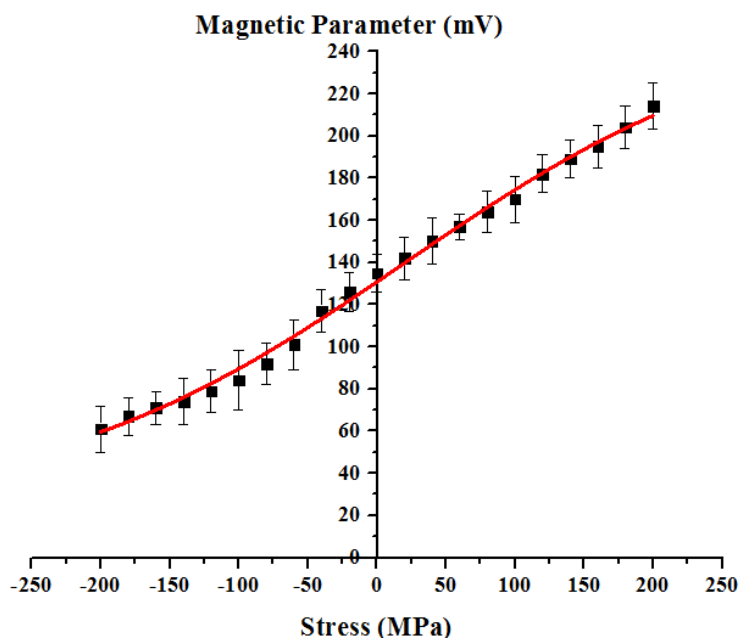
Στην εικόνα 5 παρουσιάζονται, αντίστοιχα, οι μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Είναι αξιοσημείωτη η μορφή της καμπύλης της μαγνητικής διαπερατότητας που περιγράφει τη διακύμανση της μαγνητική τιμής στη ζώνη τήξης. Η παρουσία της «διπλής κορυφής» είναι χαρακτηριστικό της περιστροφής του διανύσματος της μαγνήτισης.



Εικόνα 4-5 : Μορφή μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

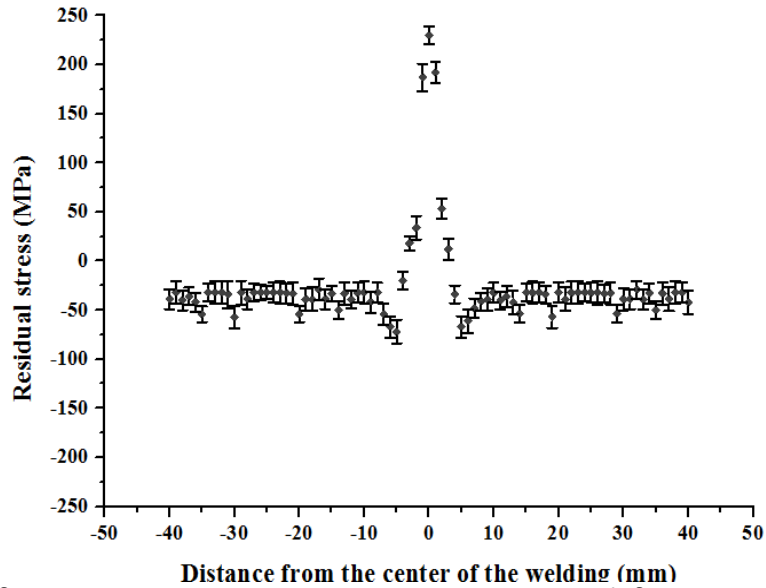
4.3.4 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Για την εκτίμηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα δοκίμια, πραγματοποιήθηκαν μαγνητικές μετρήσεις σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων. Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης (εικόνα 4-6) πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των μετρήσιμων τιμών του μαγνητικού θορύβου με την τιμή της παραμένουσας τάσης.



Εικόνα 4-6: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό των παραμένουσων τάσεων στον AISI 1008 χάλυβα. Η καμπύλη προέρχεται από την μέτρηση του υλικού αναφοράς.

Στηριζόμενοι στην καμπύλη βαθμονόμησης και στην κατανομή του μαγνητικού θορύβου (εικόνα 4-1) προσδιορίσαμε την κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 4-7.

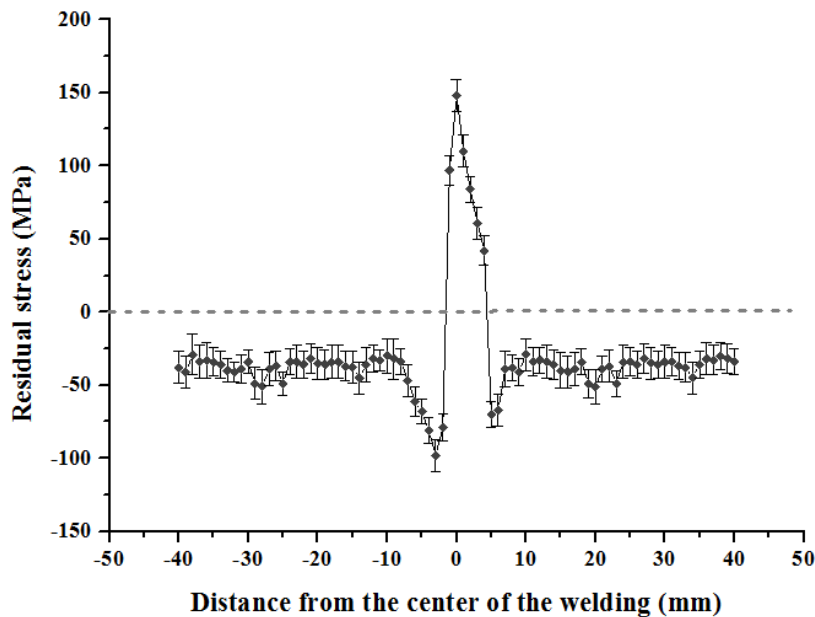


Εικόνα 4-7: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο MBN στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

4.3.5 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD)

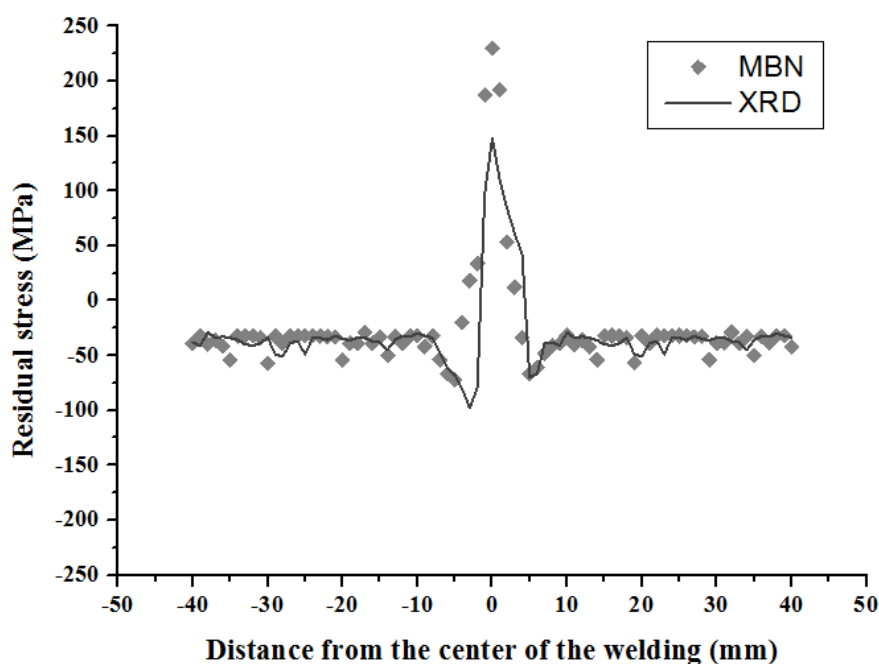
Για την επαλήθευση των παραπάνω μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο XRD, σε κάθε ζώνη συγκόλλησης σε διάφορα σημεία της επιφάνειας των συγκολλημένων δοκιμίων.

Ενδεικτικά, στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4-8) παρουσιάζεται η διαμόρφωση των τιμών των παραμενουσών τάσεων στην εκάστοτε ζώνη συγκόλλησης για μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X.



Εικόνα 4-8: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο XRD στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

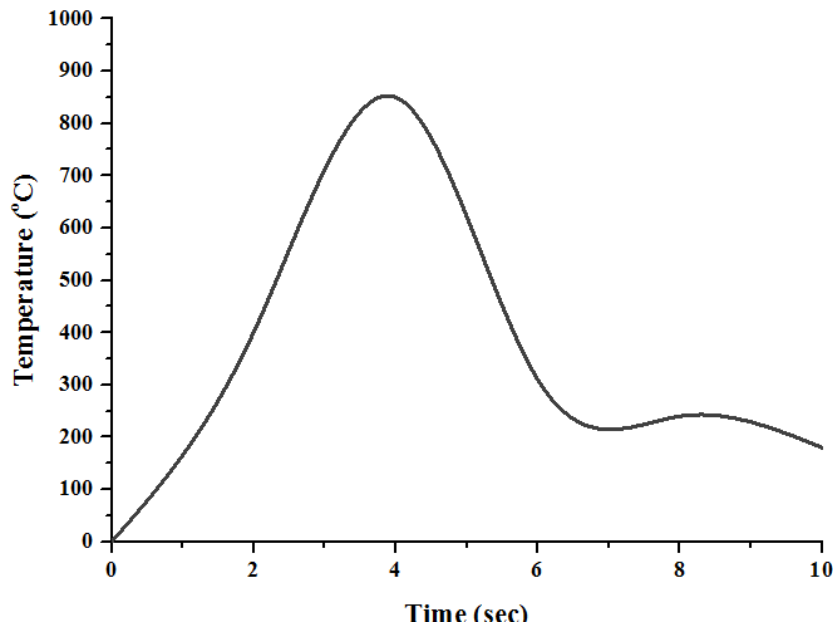
Μέσω της υπέρθεσης των αποτελεσμάτων των παραμενουσών τάσεων, όπως αυτές προκύπτουν από τις δύο παραπάνω μετρητικές μεθόδους (εικόνα 4-9), παρατηρούμε ότι οι τιμές τους δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση στο μέταλλο βάσης. Αντίθετα παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ τους στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στη ζώνη τήξης. Να σημειωθεί ότι για να μπορούν τα αποτελέσματά τους να συγκριθούν, οι τιμές των παραμενουσών τάσεων που προσδιορίστηκαν αφορούν σχεδόν τα ίδια σημεία μέτρησης στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της κατάστασης του υλικού στο σημείο αυτό και να μπορεί η σύγκριση να είναι αξιόπιστη.



Εικόνα 4-9: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους MBN και XRD στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

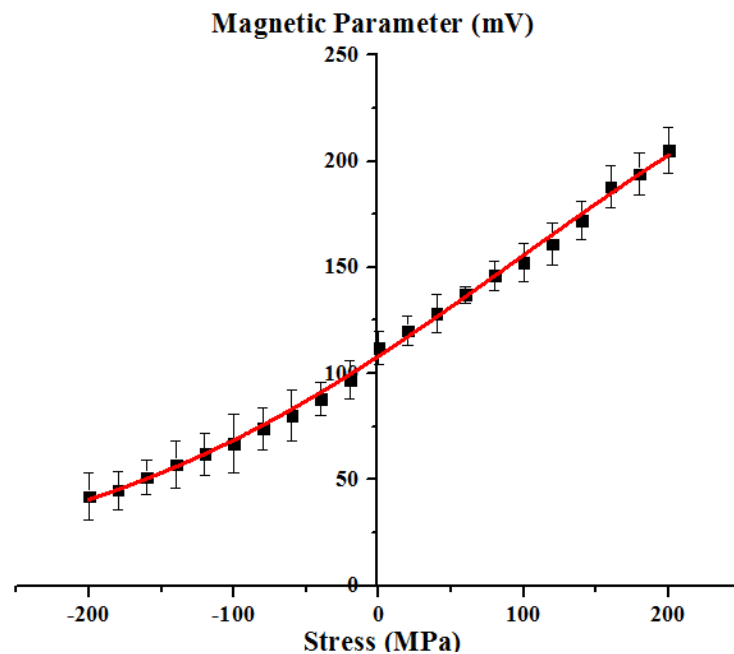
Τα αίτια της απόκλισης των τιμών των παραμενουσών τάσεων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στη ζώνη τήξης οφείλονται κυρίως τις μικροδομικές αλλαγές που υφίστανται στις ζώνες αυτές λόγω της ταχύτατης θέρμανσης και της επακόλουθης απόψυξης τους και στην μεταβολή της ποσοστιαίας συμμετοχής της περλιτικής φάσης. Το γεγονός αυτό οδήγησε αρχικά στο συμπέρασμα ότι η καμπύλη βαθμονόμησης δεν μπορεί να είναι κοινή στο μέταλλο βάσης και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Για το λόγω αυτό, μέσω της χρήσης πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίστηκε ο θερμοκρασιακός κύκλος (εικόνα 9) ώστε να προσδιοριστεί η διαμόρφωση του θερμοκρασιακού πεδίου συναρτήσει του χρόνου της συγκόλλησης. Για το χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής παράμετροι: θερμική αγωγιμότητα $k=0.04 \text{ W/mm}^\circ\text{C}$, θερμοχωρητικότητα $\alpha=8 \text{ mm}^2/\text{s}$ και $\rho c=0.005 \text{ J/mm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ (όπου ρ η πυκνότητα του χάλυβα σε kg/m^3 και c η ειδική θερμότητα σε $\text{J/Kg}^\circ\text{C}$) καθώς επίσης και οι τιμές που δίνονται στον πίνακα 3. Μέσω του θερμοκρασιακού

κύκλου (εικόνα 4-10) προσδιορίστηκε η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία φτάνει το υλικό στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη καθώς και ο ρυθμός απόψυξης του.



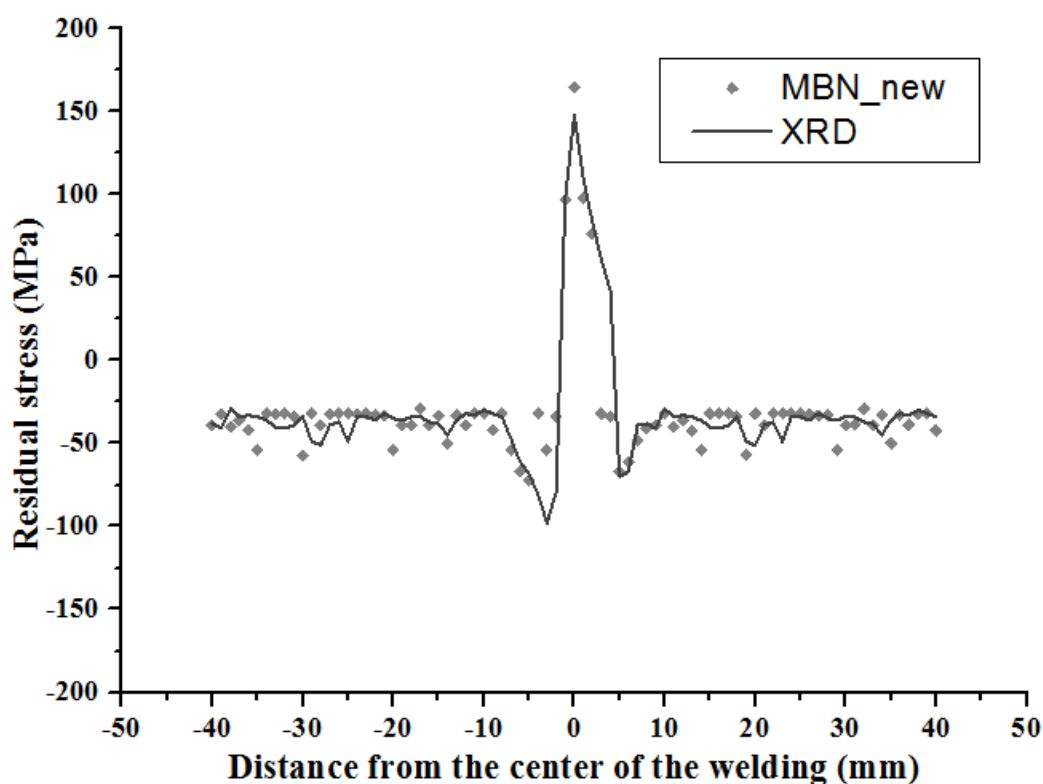
Εικόνα 4-10: Θερμοκρασιακός κύκλος θερμικά επηρεασμένης ζώνης για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW.

Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, από το αρχικό δείγμα κόπηκαν κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια για δοκιμές εφελκυσμού/ θλίψης εντός της ελαστικής περιοχής με σκοπό τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης που αφορά τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (εικόνα 4-11).



Εικόνα 4-11: Καμπύλη βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη στο συγκολλημένο χάλυβα AISI 1008. Η καμπύλη προέρχεται από την μέτρηση ανοπτημένου υλικού αναφοράς σύμφωνα με το θερμοκρασιακό κύκλο.

Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης (εικόνα 4-10) προσδιορίζονται οι νέες τιμές των παραμενουσών τάσεων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του συγκολλημένου υλικού (εικόνα 12).



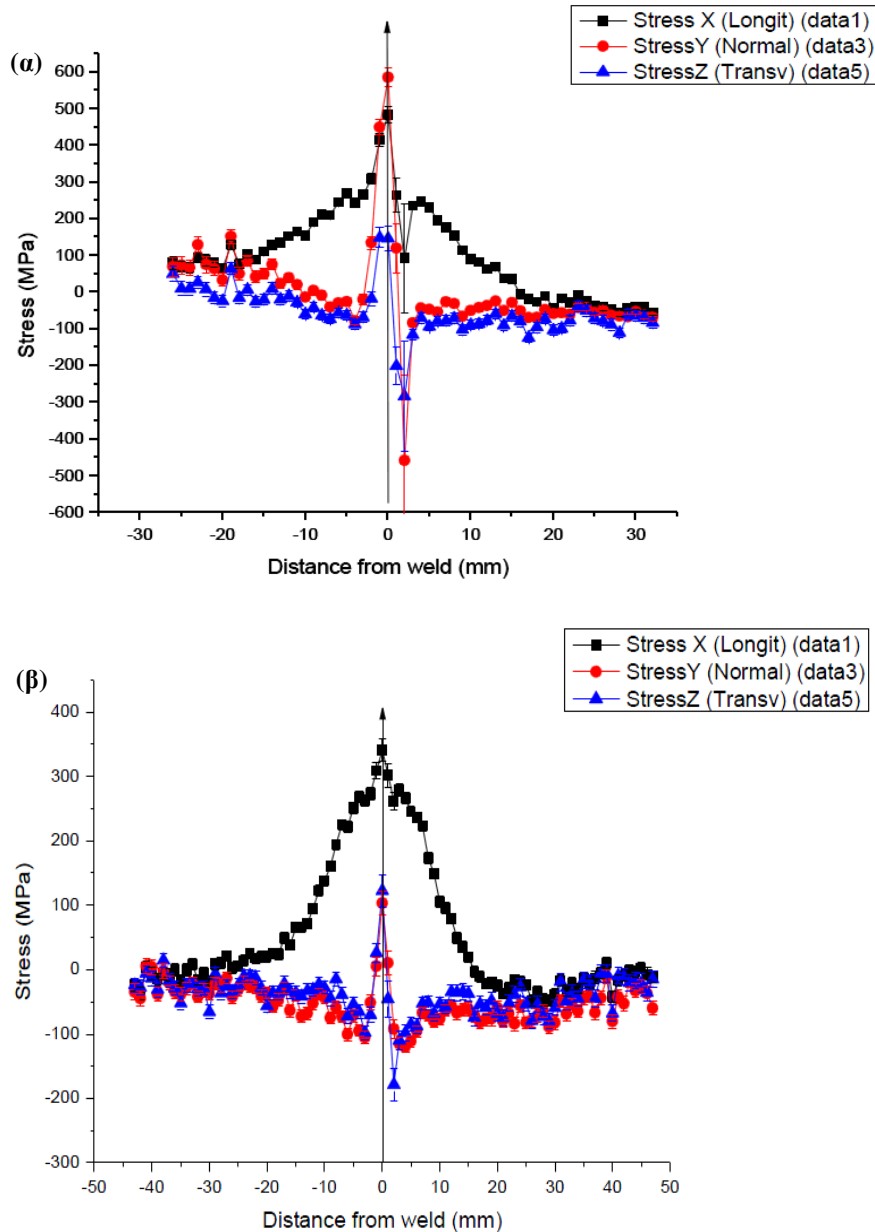
Εικόνα 4-12: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους MBN και XRD στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW. Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο καμπύλων βαθμονόμησης.

Η διακύμανση των τιμών της τάσεων που προσδιορίστηκαν με τις μεθόδους του μαγνητικού θορύβου και της περιθλασιμετρίας ακτίνων X βρίσκονται μεταξύ αποδεκτών ορίων. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή της παραμένουσας τάσης ακριβώς στο κέντρο της ζώνης τήξης της συγκόλλησης. Χρειάζεται να προσδιοριστεί ο θερμικός κύκλος της ζώνης τήξης και να προκύψει η κατάλληλη καμπύλη βαθμονόμησης ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η τιμή της παραμένουσας τάσης στη ζώνη αυτή.

4.3.6 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων

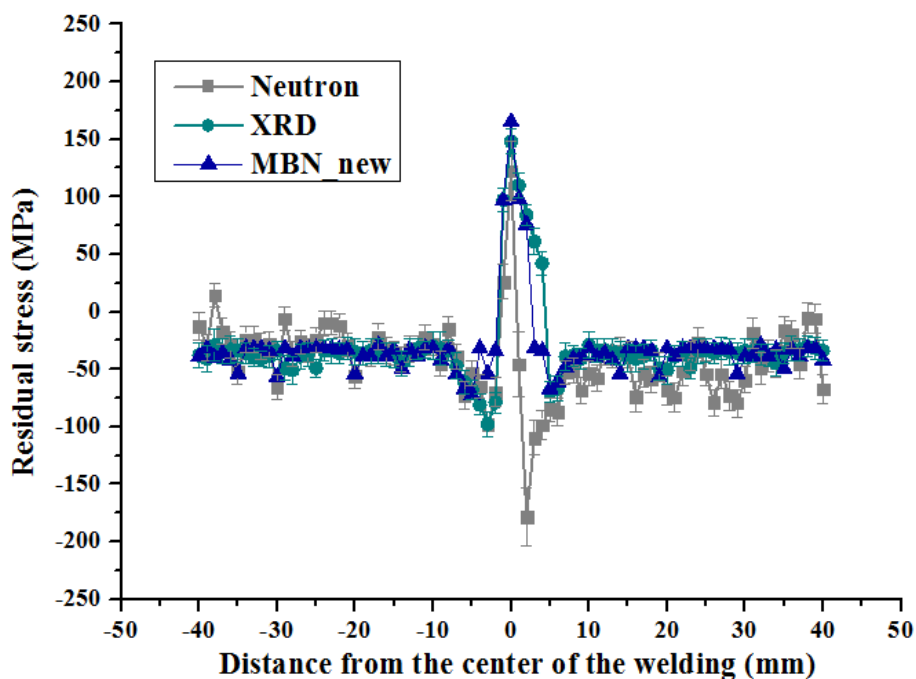
Για την επαλήθευση των παραπάνω μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο περίθλασης νετρονίων, σε κάθε ζώνη συγκόλλησης σε διάφορα σημεία της επιφάνειας των συγκολλημένων δοκιμίων.

Ενδεικτικά, στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4-13) παρουσιάζεται η διαμόρφωση των τιμών των παραμενουσών τάσεων στην εκάστοτε ζώνη συγκόλλησης για μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την προαναφερόμενη μέθοδο περίθλασης.



Εικόνα 4-13: Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων στη θέση (α) $Z = 50$ και (β) $Z = 100$ για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Η υπέρθεση των τιμών των παραμενουσών τάσεων, που αντιστοιχούν στα σημεία $Z = 50$ (εικόνα 13α), όπως αυτές προκύπτουν από την χρήση των προαναφερόμενων μεθόδων παρουσιάζεται στην εικόνα 4-14.



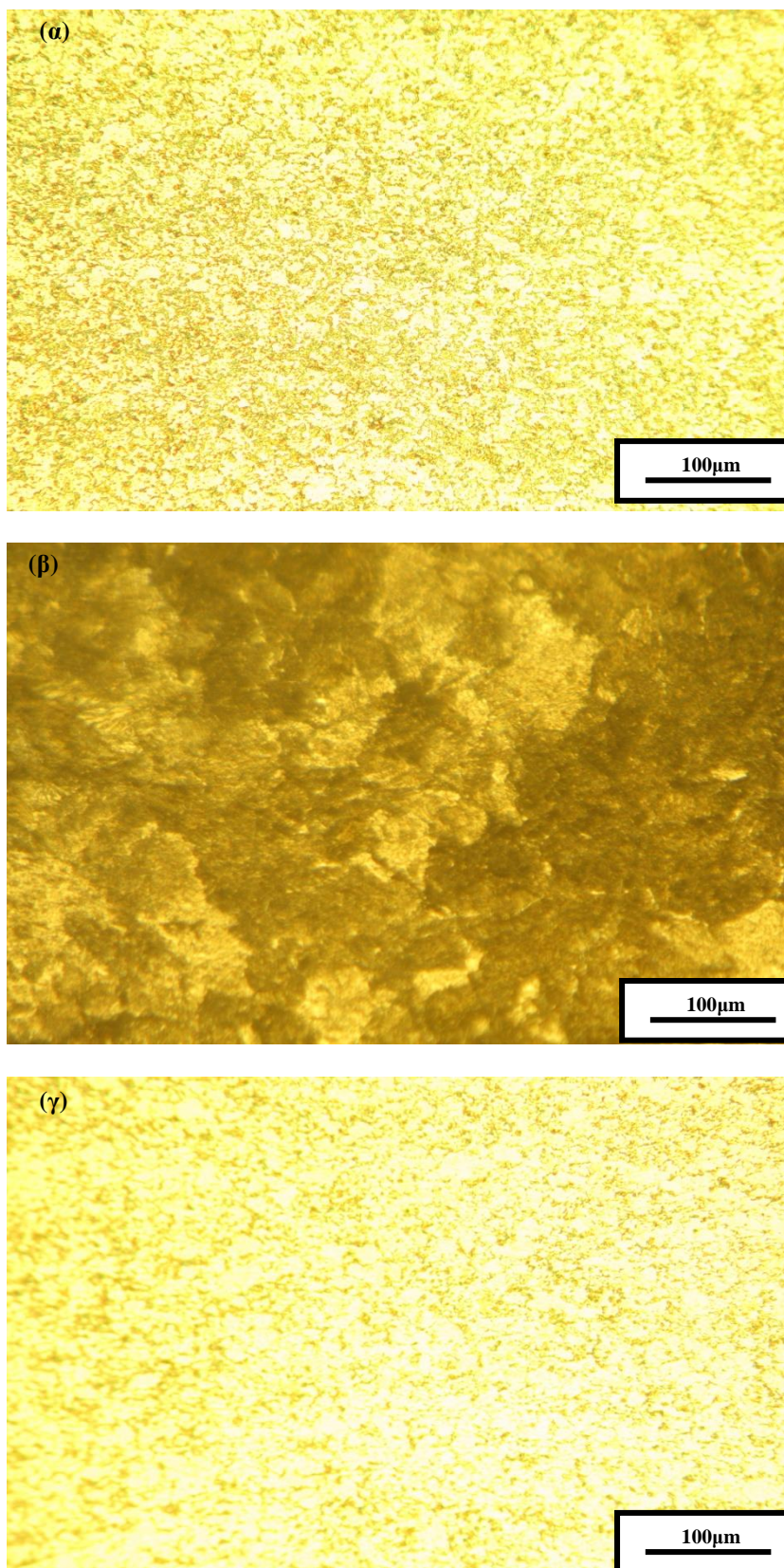
Εικόνα 4-14: Ενδεικτικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους MBN, XRD και Neutron στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Είναι φανερό ότι η μέθοδος της περίθλασης νετρονίων για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων στο συγκολλημένο δοκίμιο παρουσιάζει αποκλίσεις από τις άλλες δύο μεθόδους (MBN και XRD). Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης της δέσμης των νετρονίων έναντι των ακτίνων X και του πεδίου μαγνήτισης

4.3.7 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω οπτικού μικροσκοπίου

Από τις εικόνες οπτικού μικροσκοπίου παρατηρούμε, στο μέταλλο βάσης (εικόνα 4-15α), την ύπαρξη κόκκων περλίτη (μαύρη περιοχή) και την ανάπτυξη προευτηκτοειδούς φερρίτη (ανοιχτόχρωμη περιοχή) στα όρια των κόκκων του. Ο περλίτης, ως μικροδομικό συστατικό, αποτελείται από επαναλαμβανόμενες λωρίδες φερρίτη και σεμεντίτη (Fe_3C). Ωστόσο, λόγω της μικρής μεγέθυνσης που επιλέχθηκε στο οπτικό μικροσκόπιο δεν διακρίνονται ευκρινώς. Είναι δυνατό όμως να παρατηρηθεί η ετεροτροπία στον προσανατολισμό ανάπτυξης των περλιτικών κόκκων. Να σημειωθεί ότι, τυχόν εναρκτήρια σημεία ρωγμών, τα οποία δεν παρατηρούνται, αναμένεται να εμφανίζονταν στον προευτηκτοειδή φερρίτη, που ως μαλακότερος από τον περλίτη, θα απορροφά όλες οι μηχανικές τάσεις.

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (εικόνα 4-15β) παρατηρούνται διευρυμένοι κόκκοι φερρίτη και διακρίνεται και σφαιροποιημένος σεμεντίτης, ενώ στη ζώνη τήξης (εικόνα 4-15γ) είναι εμφανής η χαρακτηριστική δενδριτική δομή.



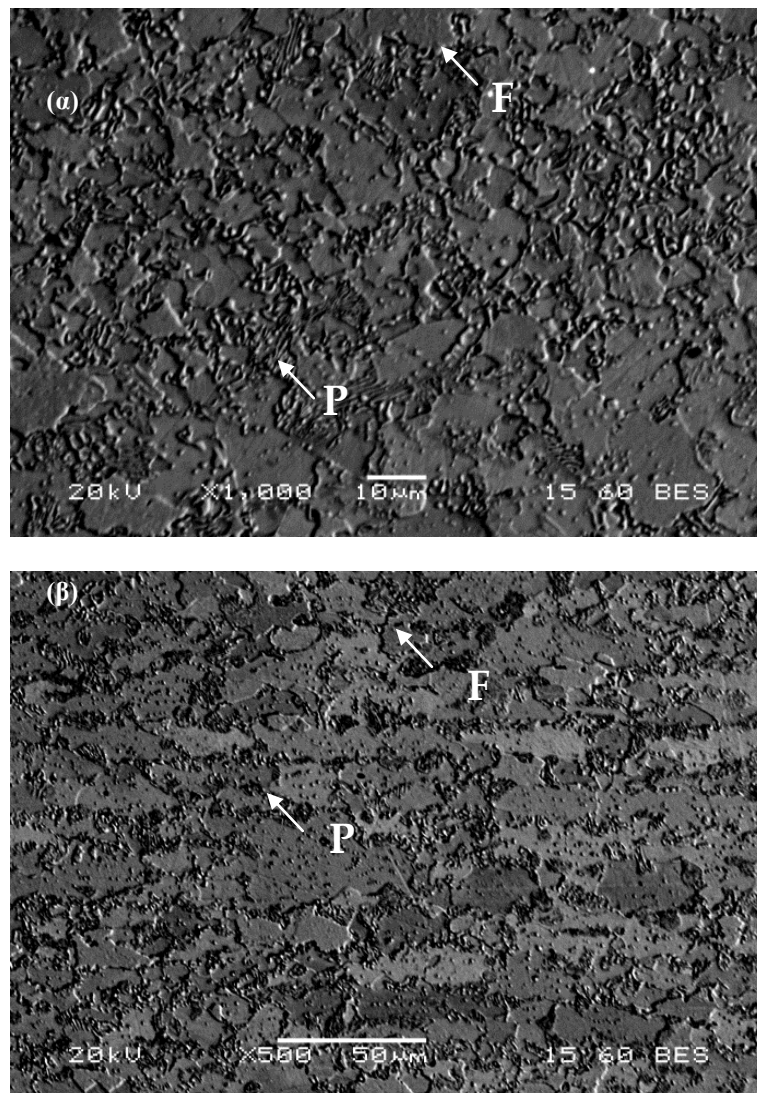
Εικόνα 4-15: Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης.

Η περιορισμένη αναλυτική ικανότητα του μικροσκοπίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή ευκρίνεια των εικόνων επιτρέπουν την λεπτομερή απεικόνιση των μικροδομικών

χαρακτηριστικών της εκάστοτε ζώνης της συγκόλλησης, καθώς επίσης και του προσδιορισμού του μέσου μεγέθους των κόκκων (φερριτικών και περλιτικών αντίστοιχα) στο μέταλλο βάσης και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της κάθε ζώνης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

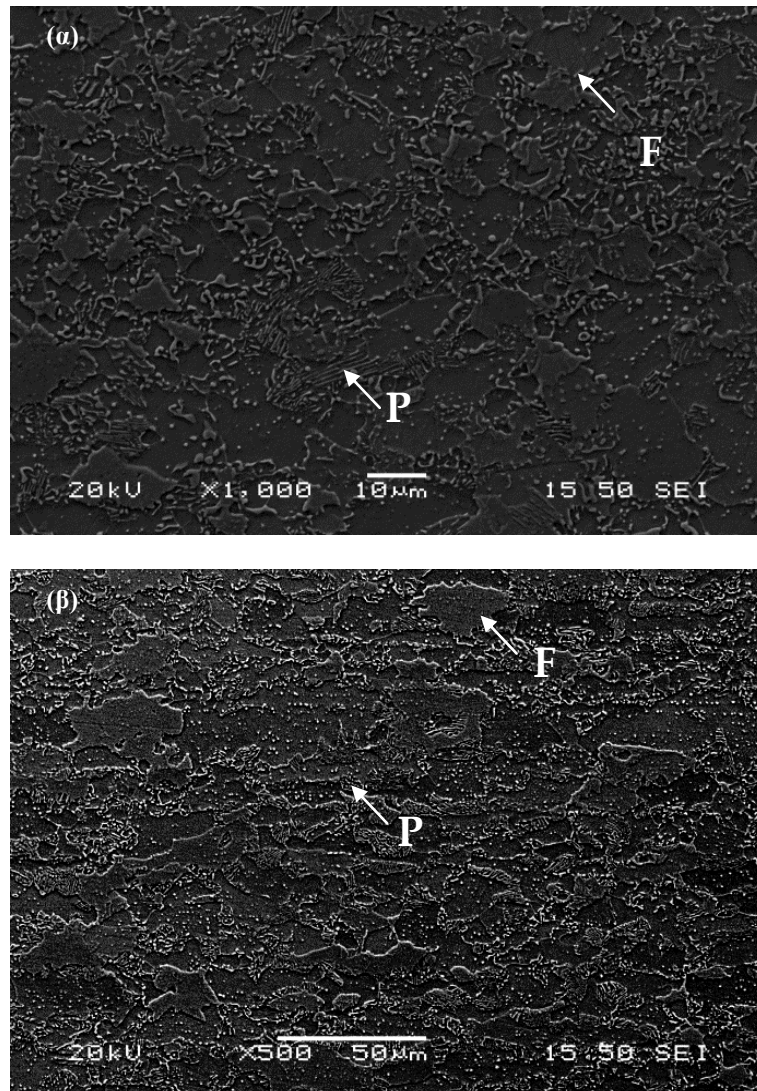
4.3.8 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)

Μέσω εικόνας πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (εικόνα 4-16) παρατηρήθηκε η επιφάνεια (εικόνα 4-16α) και η κάθετη διατομή (εικόνα 4-16β) του συγκολλημένου δείγματος AISI 1008. Ταυτοποιήθηκε, με τη χρήση αντίθεσης πεδίου, η ανάπτυξη μικρογραφικού ιστού μέσω της συμμετοχής φάσεων εντός θερμοδυναμικής ισορροπίας (προευτηκτοειδής φερρίτης, F) και μικρογραφικών συστατικών (ευτηκτοειδή περλίτη (P).



Εικόνα 4-16: Εικόνα οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή του μετάλλου βάσης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.

Μέσω του έντονου τεχνητού τοπογραφικού αναγλύφου που προσφέρουν οι εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (εικόνα 4-17) παρατηρήθηκε η επιφάνεια (εικόνα 4-17α) και η κάθετη διατομή (εικόνα 4-17β) του βασικού μετάλλου του συγκολλημένου δείγματος AISI 1008 και προσδιορίστηκε η μορφολογία και η κατανομή των κόκκων στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Όπως προκύπτει, το μέταλλο βάσης χαρακτηρίζεται από ισαξονικούς και πολυγωνικούς φερριτικούς κόκκους και περλιτικούς κόκκους πλακοειδούς μορφολογίας.

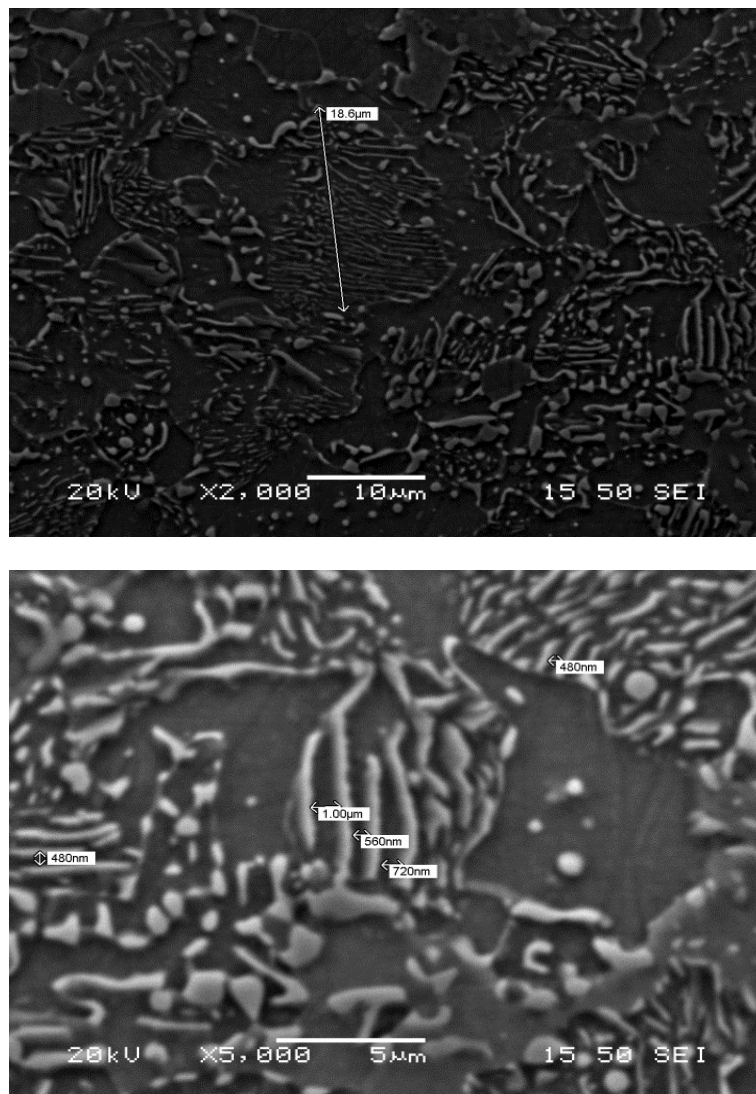


Εικόνα 4-17: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή του μετάλλου βάσης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.

Μέσω της χρήσης του λογισμικού image analyzer πραγματοποιήθηκε η έμμεση εκτίμηση του κλάσματος όγκου συμμετοχής της μητρικής φάσης και του μητρικού μικροδομικού συστατικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προευνθηκτοειδής φερρίτης αποτελεί την

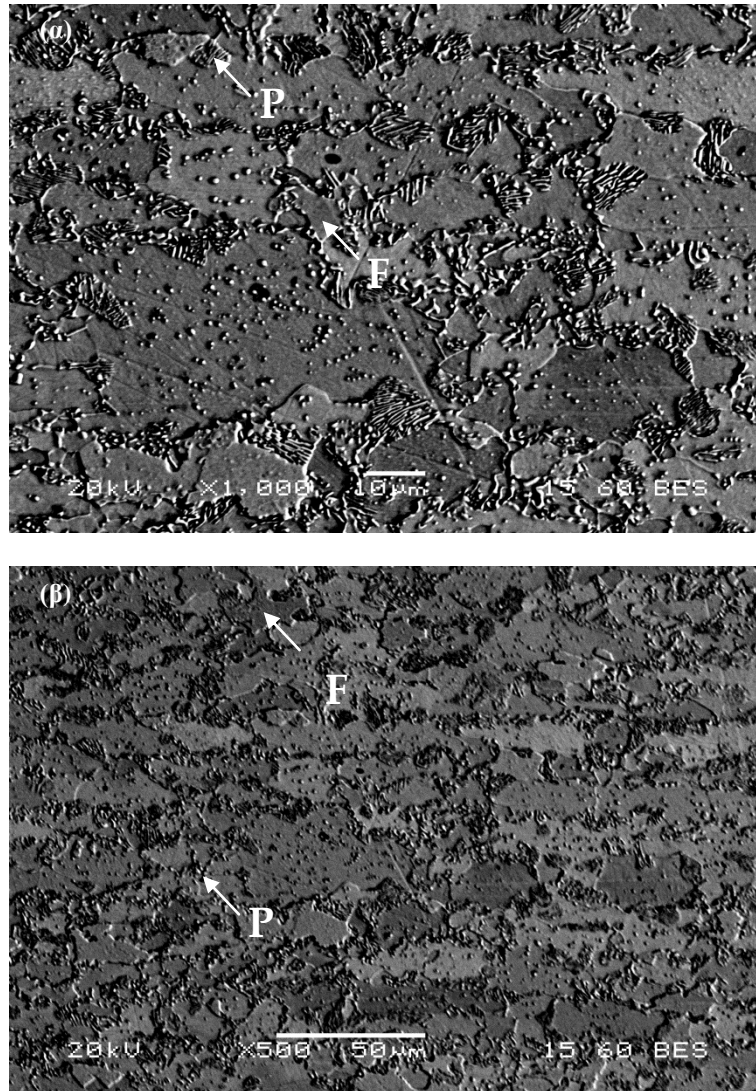
κυρίαρχη μητρική φάση με ποσοστό συμμετοχής στην επιφάνεια του δείγματος ~89%), ενώ περλίτης συμμετέχει με ποσοστό μόλις 11%.

Το μέσο μέγεθος των περλιτικών κόκκων είναι περίπου 18,6 μm (εικόνα 4-18α). Ο περλίτης χαρακτηρίζεται από πλακοειδή μορφολογία με τη μέση απόσταση των πλακιδίων σεμεντίτη στα 720 nm (εικόνα 4-18β).



Εικόνα 4-18: Ενδεικτική μέτρηση (α) του μεγέθους ενός περλιτικού κόκκου και (β) της ενδολαμικής του απόστασης.

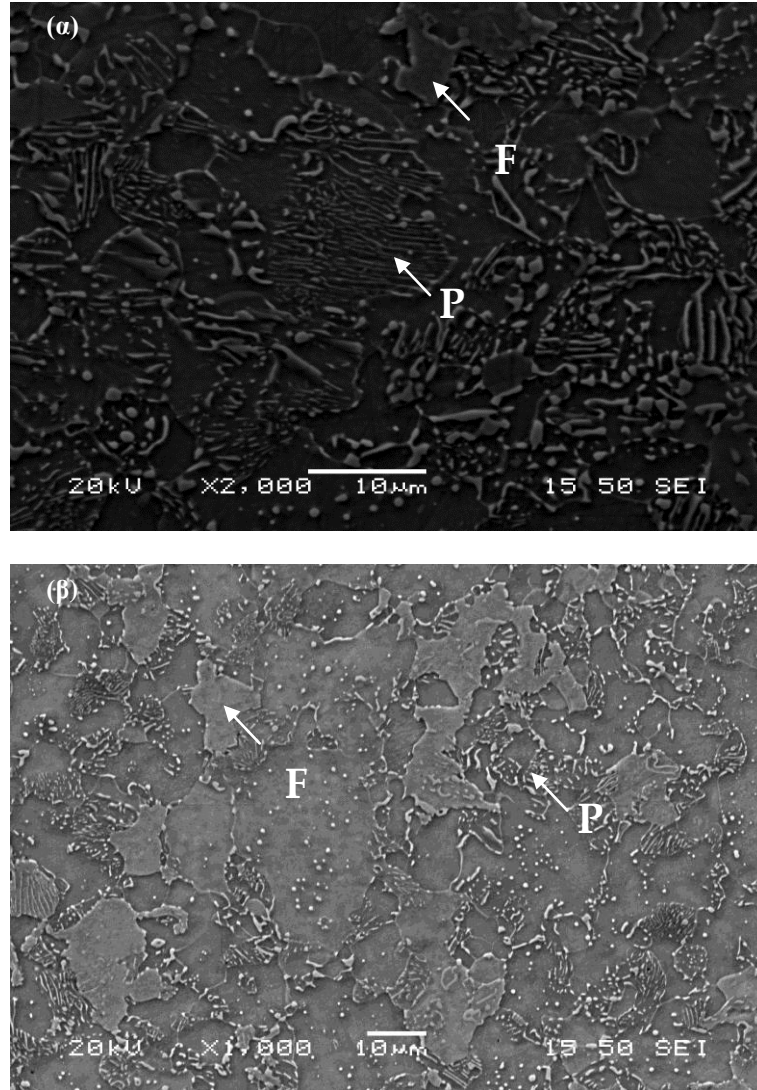
Για το μικροδομικό χαρακτηρισμό της θερμικά επηρεασμένης ζώνης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία. Μέσω της αντίθεσης πεδίου που προσφέρει η εικόνα οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (εικόνα 4-19) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ταυτοποιήθηκε η φερροπερλιτική δομή.



Εικόνα 4-19: Εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.

Αντίστοιχα, μέσω του έντονου τεχνητού τοπογραφικού αναγλύφου που προσφέρουν οι εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (εικόνα 4-20) παρατηρήθηκε η επιφάνεια (εικόνα 4-20α) και η κάθετη διατομή (εικόνα 4-20β) της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του συγκολλημένου δοκίμιου AISI 1008. Προέκυψε ότι, ως μικροδομικό συστατικό ο περλίτης χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία ως προς τον προσανατολισμό και τη μορφολογική ετερογένεια, καθώς δεν παρατηρείται να ακολουθεί την πολυγωνική ισαξονική δομή. Να σημειωθεί ότι, στο λεπτοκρυσταλλικό περλίτη τα πλακίδια του σεμεντίτη δε χαρακτηρίζονται από παραλληλία και η ύπαρξη σφαιροποιημένου σεμεντίτη δηλώνει ότι η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στη ζώνη αυτή έφτασε τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Ο προευκτοειδής φερρίτης χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια του μέσου μεγέθους ανάπτυξής του και ετερογένεια ως προς τη κατευθυντικότητά του. Ωστόσο, οι κόκκοι

παρουσιάζονται μεγαλύτεροι συγκριτικά με τους αντίστοιχους φερριτικούς κόκκους στο βασικό μέταλλο. Παρουσιάζει χαρακτηριστικές μορφολογικές δομές που κλείνουν περισσότερο σε γωνιώδη συμμετρία, ενώ απουσιάζουν οι ισαξονικοί φερριτικοί κόκκοι που υπονοεί συνθήκες συμμετοχής αλλοτροπικών μορφών.

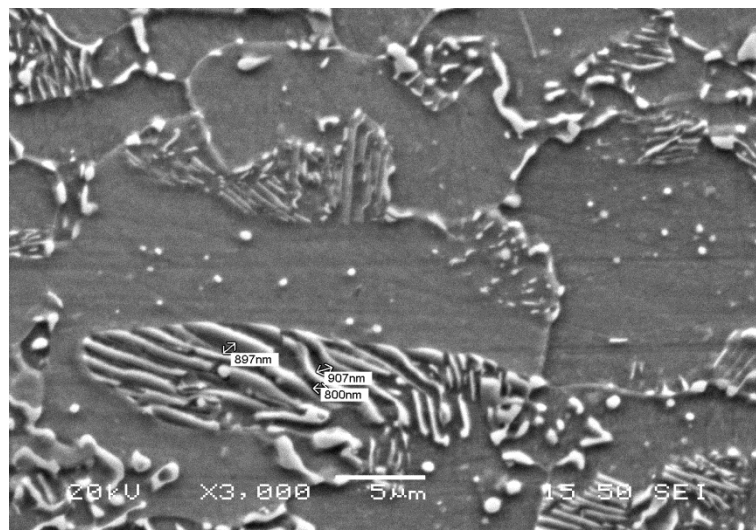


Εικόνα 4-20: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) από την κάθετη διατομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, για το συγκολλημένο δοκίμιο με τη μέθοδο EBW. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P οι κόκκοι του περλίτη.

Σε συνδυασμό με την ανάλυση εικόνας στο λογισμικό image analyser πραγματοποιήθηκε η έμμεση εκτίμηση του κλάσματος όγκου συμμετοχής της μητρικής φάσης και του μητρικού μικροδομικού συστατικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προευτηκτοειδής φερρίτης αποτελεί την κυρίαρχη μητρική φάση με ποσοστό συμμετοχής στην επιφάνεια του δείγματος (~70%), ενώ περλίτης συμμετέχει με ποσοστό μόλις 30%. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κλάσμα όγκου συμμετοχής του λεπτοκρυσταλλικού περλίτη

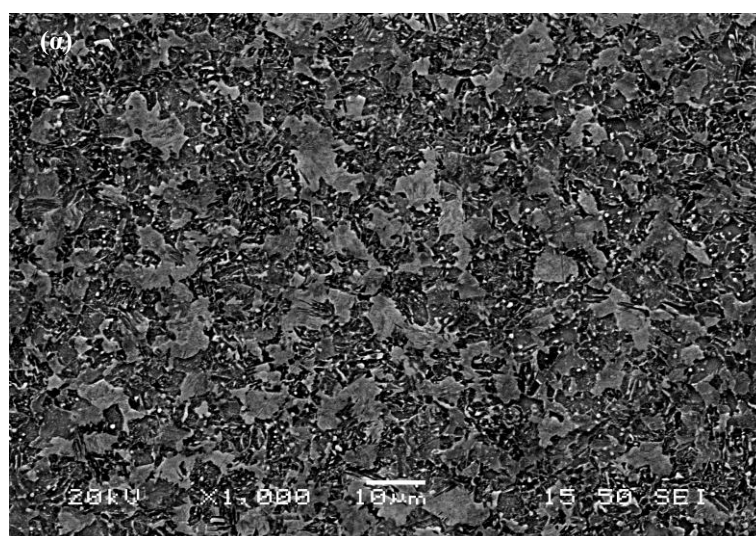
ήταν σχετικά υψηλό (84%), ενώ παρατηρήθηκε περιορισμένη τοπολογία ανάπτυξης του χοντροκρυσταλλικού περλίτη (16%).

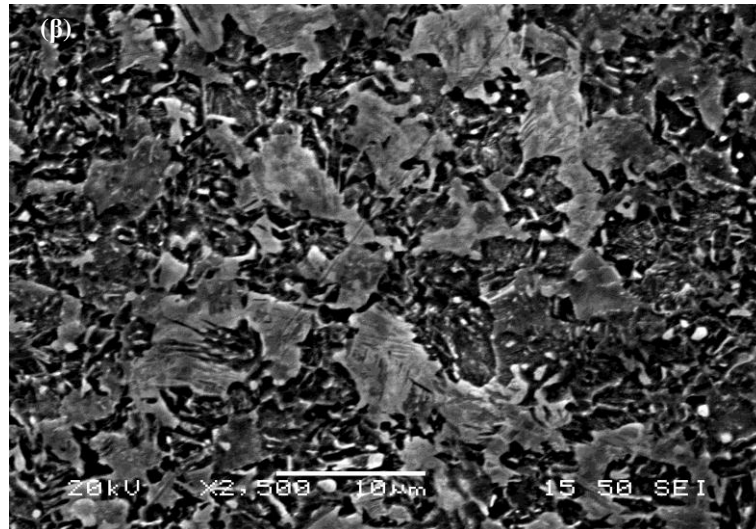
Ο περλίτης χαρακτηρίζεται από πλακοειδή μορφολογία με τη μέση απόσταση των πλακιδίων σεμεντίτη στα 880 nm και από σφαιρική μορφολογία με διάμετρο, περίπου 560nm.



Εικόνα 4-21: Ενδεικτική μέτρηση της ενδολαμικής απόστασης του χοντροκρυσταλλικού περλίτη.

Τέλος, η ζώνη τήξης (εικόνα 4-22) χαρακτηρίζεται από μη-ισοαξονικούς κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη, κάτι που ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι αλληλοεπικαλύπτονται με μπαινίτη. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (εικόνα 4-22β) παρατηρήθηκε η συμμετοχή αλλοτριόμορφου μετασταθούς φερρίτη. Να σημειωθεί ότι η μορφολογία του μπαινίτη θα είναι φτερόμορφη (κατώτερος μπαινίτης), ενώ του αλλοτριόμορφου φερρίτη θα είναι κολονοειδής.



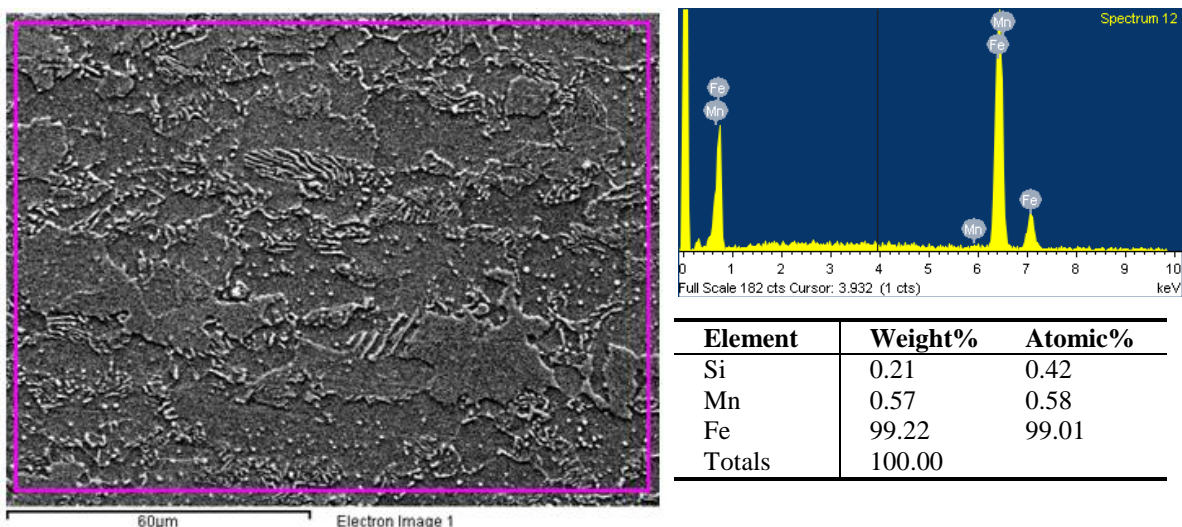


Εικόνα 4-22: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από τη ζώνη τήξης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW σε μεγεθύνσεις (α) x1000 και (β) x2500.

4.3.9 Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)

Από τα αποτελέσματα της χημικής μικροανάλυσης, παρατηρούμε ότι το υπό εξέταση δείγμα χαρακτηρίζεται από διακυμαινόμενη ανακατανομή των χημικών στοιχείων από ενδοκρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας σε περικρυσταλλικές περιοχές (partitioning).

Μέσω της γενικευμένης χημικής μικροανάλυσης επιβεβαιώνεται ότι η κατά βάρος περιεκτικότητα του Mn είναι 0.57 wt%, όπως δηλ. δόθηκε και από τον προμηθευτή (πίνακας 1). Ενδεικτικά παρουσιάζονται (εικόνα 4-23) τα αποτελέσματα μιας γενικευμένης χημικής ανάλυσης (εικόνα εξεταζόμενης περιοχής, φάσμα χημικής μικροανάλυσης και ποσοστιαία συμμετοχή των κραμματικών στοιχείων) στην επιφάνεια του δείγματος AISI 1008.

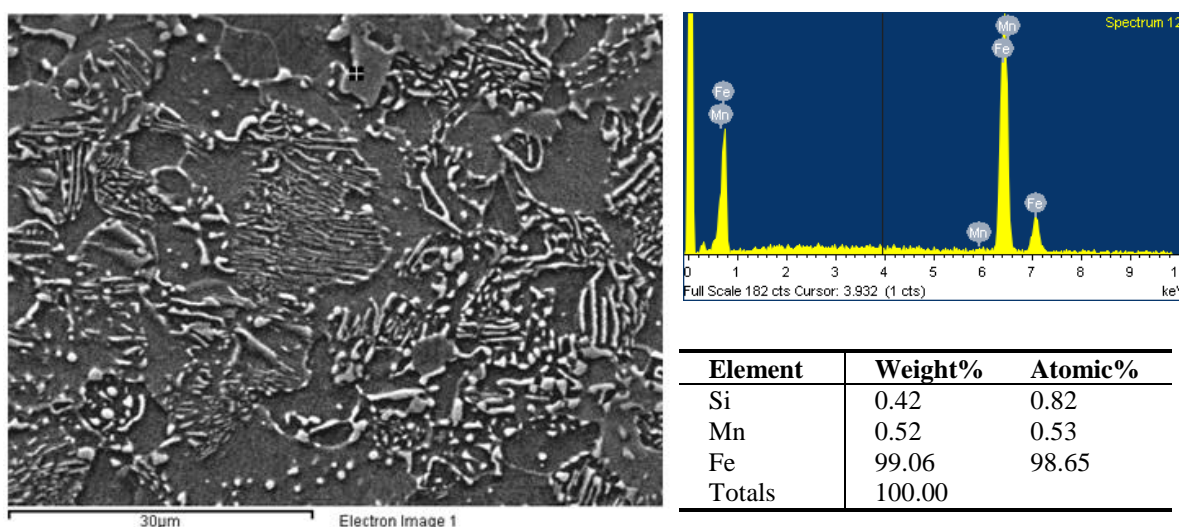


Εικόνα 4-23: Ενδεικτική γενικευμένη χημική μικροανάλυση στο μέταλλο βάσης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Πίνακας 4-1: Χημική σύσταση του αρχικού υλικού που παρελήφθη.

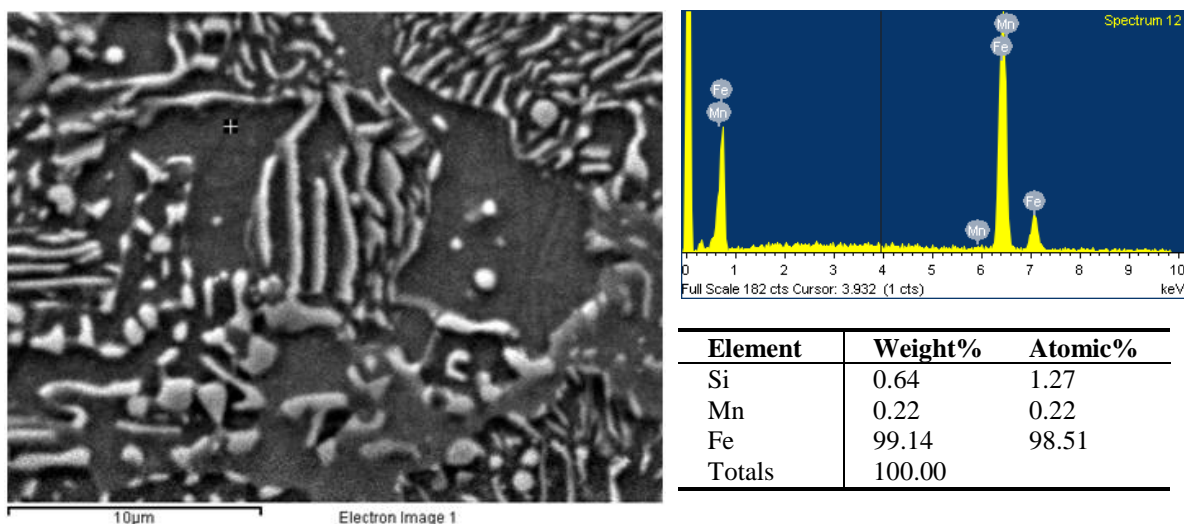
Χημικό στοιχείο	Κατά βάρος περιεκτικότητα (wt%)
Si	0.181
Mn	0.528
C	0.063
P	0.028
S	0.012
Cu	0.047
Ni	0.018
Cr	0.016
Mo	0.014
Fe	Balance

Μέσω της σημειακής χημικής μικροανάλυσης προσδιορίστηκε, τόσο σε περικρυσταλλικές όσο και σε ενδο-κρυσταλλικές θέσεις, η κατά βάρος περιεκτικότητα των κύριων κραμματικών στοιχείων του υλικού. Οι μετρήσεις παραγματοποιήθηκαν σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται (εικόνα 4-23) τα αποτελέσματα των σημειακών στοιχειομετρικών αναλύσεων (εικόνα εξεταζόμενης περιοχής, φάσμα χημικής μικροανάλυσης και ποσοστιαία συμμετοχή των κραμματικών στοιχείων) σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.



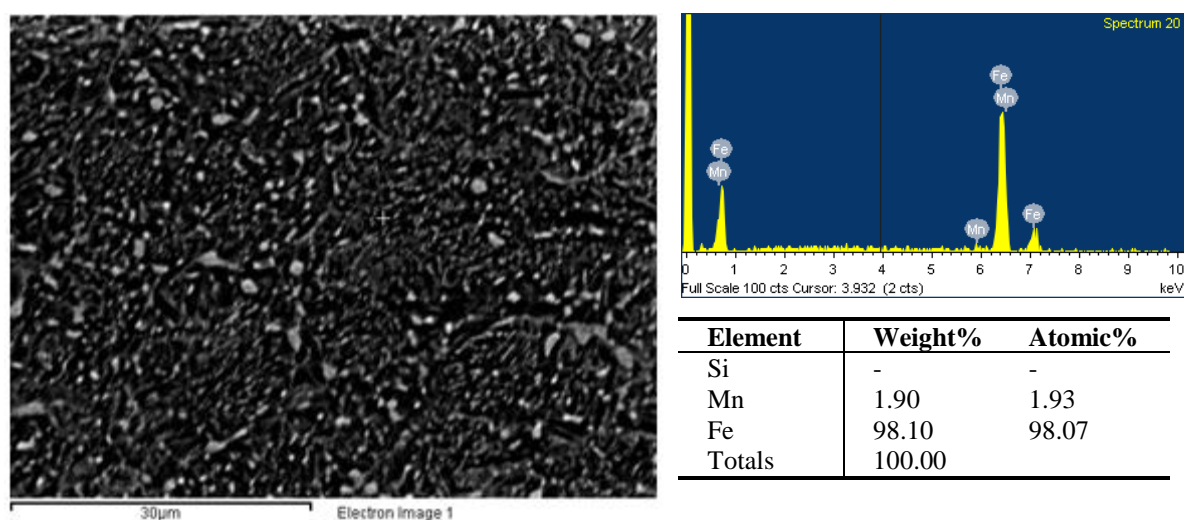
Εικόνα 4-24: Ενδεικτική σημειακή χημική μικροανάλυση στο μέταλλο βάσης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, παρατηρείται έντονη ανακατανομή των κραμματικών στοιχείων στις περικρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας, ως αποτέλεσμα της ταχύτατης απόψυξης. Λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που δίνεται στο κρυσταλλικό σύστημα της θερμικά επηρεασμένης ζώνης ώστε να αποψυχθεί, τα κραμματικά στοιχεία δεν διαθέτουν τον απαιτούμενο χρόνο ώστε να πραγματοποιηθεί ομοιόμορφη διάχυσή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα.



Εικόνα 4-25: Ενδεικτική σημειακή χημική μικροανάλυση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Στη ζώνη τήξης, όπου τα θερμικά φαινόμενα είναι εντονότερα, η κατά βάρος περιεκτικότητα του Mn αυξάνεται συμματικά, ενώ του Si ελαχιστοποιείται.



Εικόνα 4-26: Ενδεικτική σημειακή χημική μικροανάλυση στη ζώνη τήξης του συγκολλημένου δοκιμίου AISI 1008 με τη μέθοδο EBW.

Στον πίνακα 4-2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της σημειακής χημικής μικροανάλυσης σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης από περι-κρυσταλλικές μετρήσεις. Αντίστοιχα στον πίνακα 4-3, παρουσιάζονται οι ενδο-κρυσταλλικές μετρήσεις.

Πίνακας 4-2: Περι-κρυσταλλικές χημικές μικροαναλύσεις.

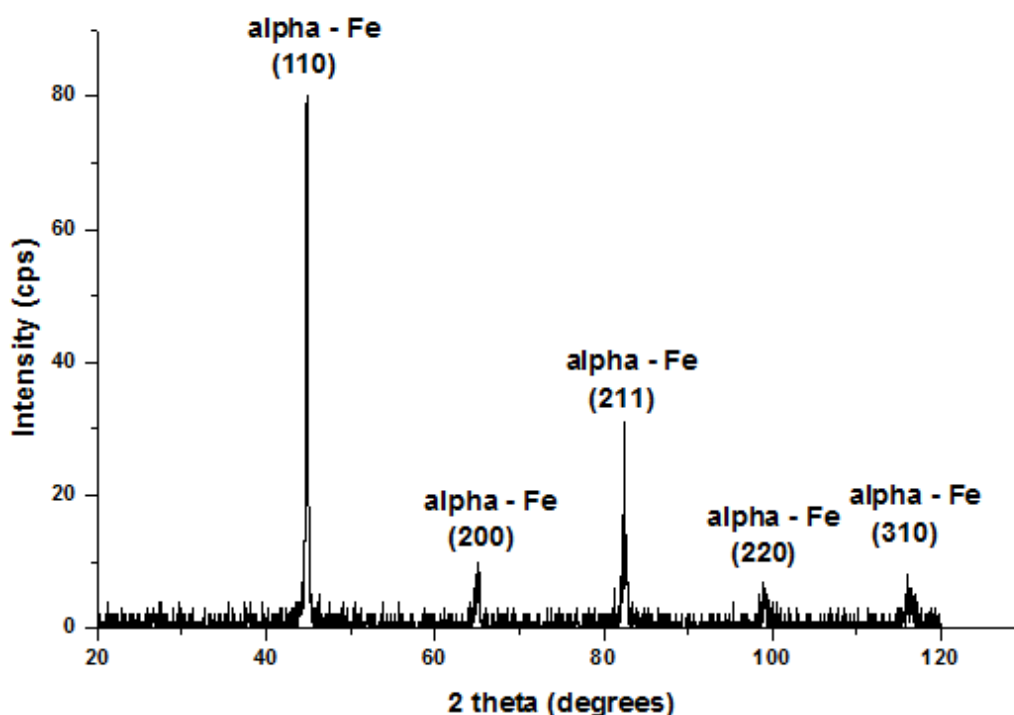
Περι-κρυσταλλικά	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Si (wt%)	0.35	0.67	-
Τυπική απόκλιση	± 8	± 9	-
Mn (wt%)	0.57	0.31	2.01
Τυπική απόκλιση	± 7	± 4	± 7

Πίνακας 4-3: Ενδοκρυσταλλικές χημικές μικροανάλυσεις.

Περι-κρυσταλλικά	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Si (wt%)	0.40	0.71	0,10
Τυπική απόκλιση	± 7	± 12	± 4
Mn (wt%)	0.52	0.22	2.08
Τυπική απόκλιση	± 7	± 9	± 10

4.3.10 Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction)

Στην εικόνα 4-27 παρουσιάζεται το αντινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας από το μέταλλο βάσης του συγκολλημένου υλικού. Στο υπό εξέταση δείγμα ταυτοποιήθηκε μόνο η φερριτική φάση και όχι ο περλίτης ως μικροδομικό συστατικό. Αν και ο χάλυβας περιέχει περλίτη δεν ανιχνεύεται γιατί η συσκευή διαθέτει λάμπα Cu.

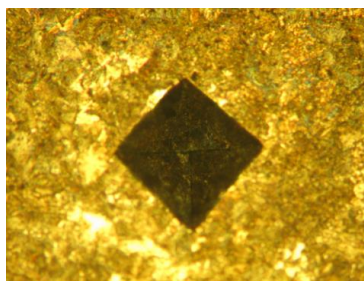


Εικόνα 4-27 : Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας του μετάλλου βάσης και ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης.

Επειδή δεν μπορεί να ταυτοποιηθεί ο περλίτης σε συνδυασμό με το διαστασεολογικό περιορισμό της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, δεν πραγματοποιήθηκαν πειράματα περιθλασιμετρίας για τις προαναφερόμενες ζώνες.

4.3.11 Μακρο-σκληρομέτρησης

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μακροσκληρότητας, με τη μέθοδο Vickers, σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του συγκολλημένου υλικού. Σε κάθε σημείο λαμβάνονταν 10 μετρήσεις με σκοπό την βελτίωση της αξιοπιστίας της μέτρησης.



Εικόνα 4-28 : Ρομβοειδές αποτύπωμα μακροσκληρομέτρησης στο μέταλλο βάσης.

Στον πίνακα 4-3 παρουσιάζονται οι τιμές της μακροσκληρότητας από την εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης, καθώς και η τυπική απόκλιση αυτών.

Πίνακας 4-4: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Μακροσκληρότητα	176,5	478,5	590,0
Τυπική απόκλιση	±7	±7	±8

4.3.12 Μικρο-σκληρομέτρησης

Στον πίνακα 4-5 παρουσιάζονται οι τιμές της μικροσκληρότητας από την εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης, καθώς και η τυπική απόκλιση αυτών.

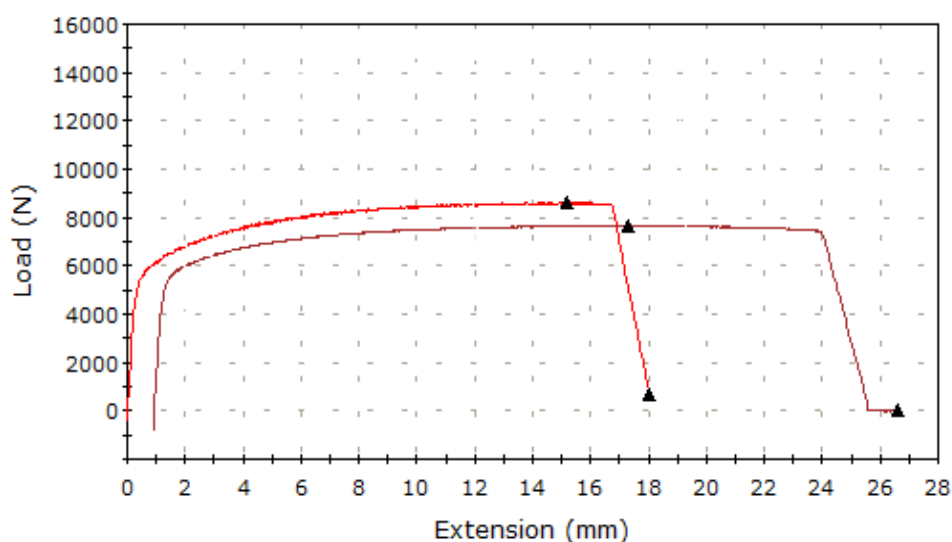
Πίνακας 4-5: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Μικροσκληρότητα	162	318,5	546,5
Τυπική απόκλιση	±8	±9	±7

4.3.13 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σ - ϵ %)

Στην εικόνα 4-29 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης του δοκιμίου που παρελήφθη και του συγκολλημένου. Είναι εμφανής η αύξηση των τιμών του ορίου διαρροής (Yield point, σ_y) και της μέγιστης εφελκυστικής τάσης θραύσης (Ultimate Tensile Strength, UTS) μετά τη συγκόλληση. Αντίθετα, το συγκολλημένο δοκίμιο, παρουσιάζει μείωση της ολκιμότητάς του (elongation). Ωστόσο, η κλίση των καμπυλών στην ελαστική περιοχή, που σχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) δεν παρουσιάζει σημαντική αλλαγή. Στον πίνακα 4-5, ποσοτικοποιούνται οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από τη στατική καταπόνηση. Συγκεκριμένα,

παρουσιάζονται συνοπτικά τα μεγέθη των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από τις καμπύλες για το δείγμα αναφοράς και το συγκολλημένο δείγμα.



Εικόνα 4-29 : Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης του δοκιμίου που παρελήφθη και του συγκολλημένου.

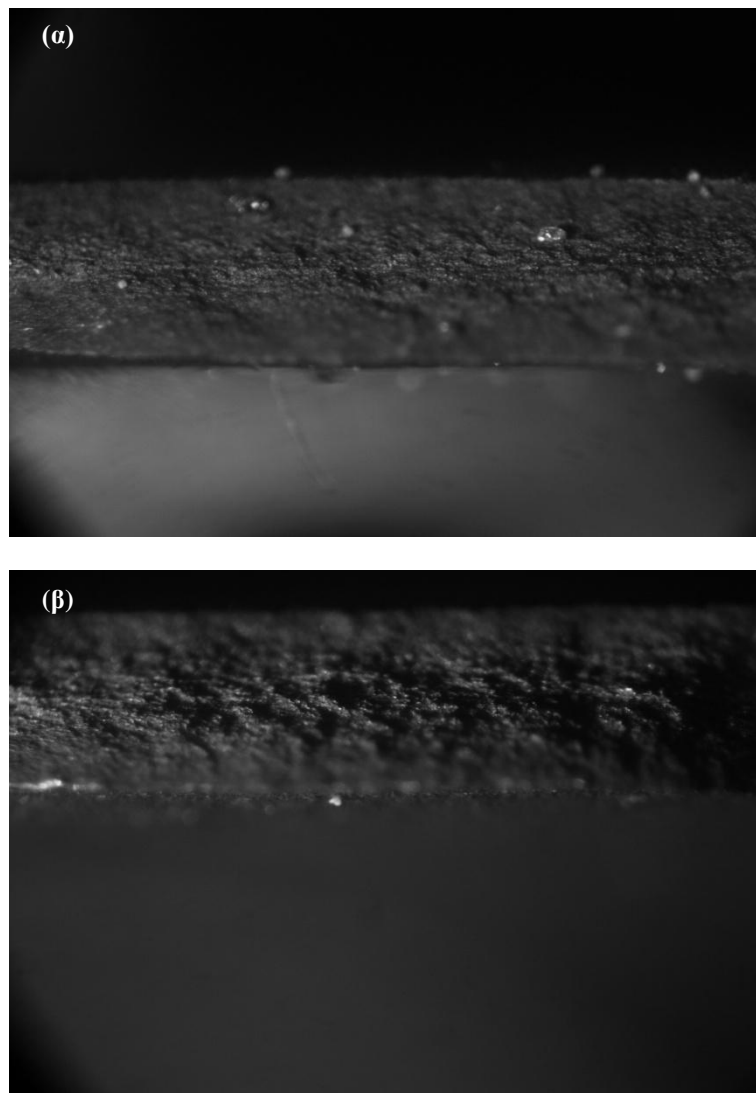
Πίνακας 4-6: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

	Δείγμα αναφοράς	Συγκολλημένο δείγμα
Όριο Διαρροής (Yield Strength) σε MPa	284	290
Μέγιστη Εφελκυστική Τάση Θραύσης (Ultimate Tensile Strength) σε MPa	350	362
Ολκιμότητα (Elongation) %	24	15
Μέτρο Ελαστικότητας (Young's Modulus) σε GPa	208	207

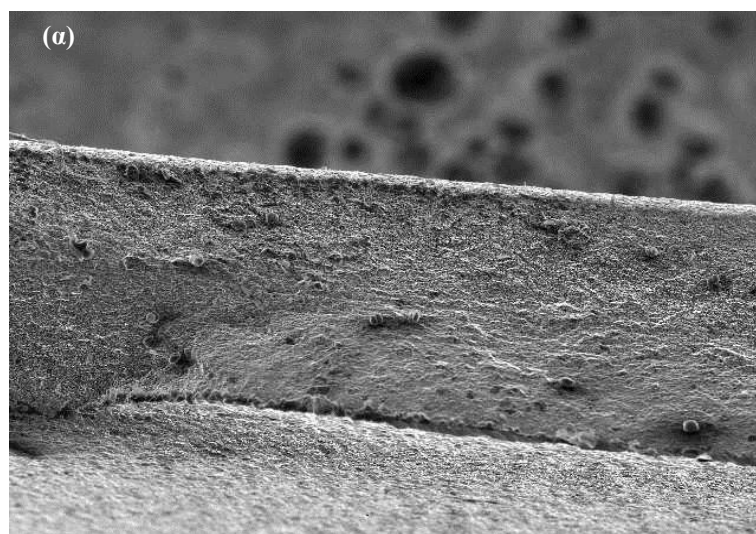
4.3.14 Θραυστογραφίες

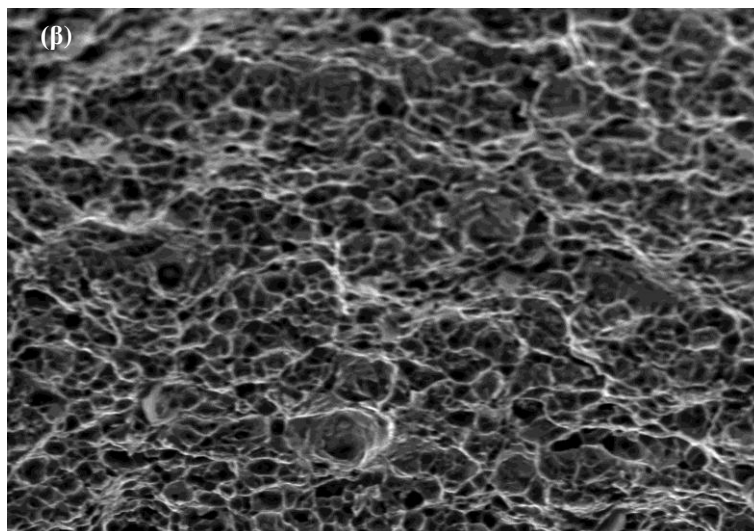
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι θραυστιγενείς επιφάνειες του υλικού αναφοράς και του συγκολλημένου υλικού, όπως προέκυψαν από τη χρήση στερεοσκοπίου (εικόνα 30) και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (εικόνες 4-31, 4-32).

Η παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης στο στερεοσκόπιο (εικόνα 4-30), δεν δίνει τη δυνατότητα μιας λεπτομερούς παρατήρησής της. Για το λόγω αυτό, κρίθηκε αναγκαία η μελέτη της στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

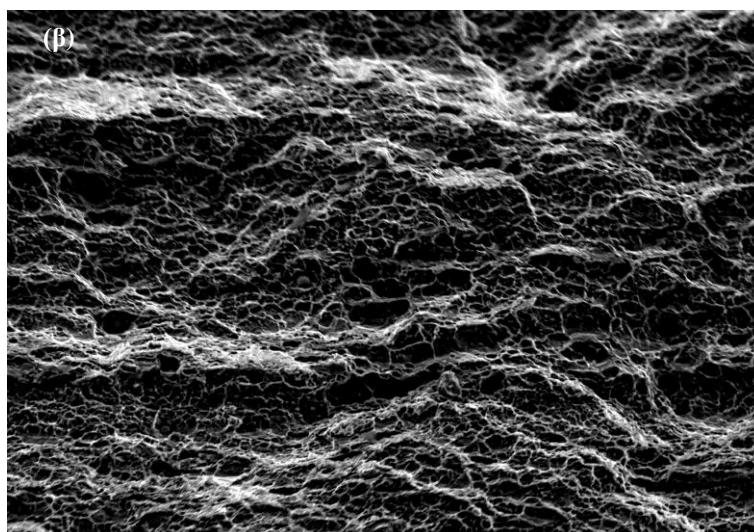
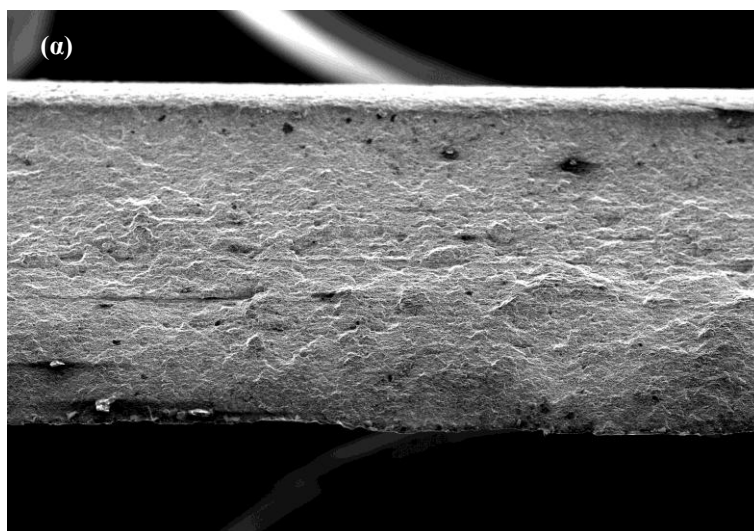


Εικόνα 4-30 : Εικόνες θραυστιγενούς επιφάνειας (α) του αρχικού δείγματος και (β) του συγκολλημένου δείγματος. Οι εικόνες ελήφθησαν από το στερεοσκόπιο.





Εικόνα 4-31 : Εικόνες θραυστιγενούς επιφάνειας του αρχικού δείγματος. Οι εικόνες ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.



Εικόνα 4-32 : Εικόνες θραυστιγενούς επιφάνειας του συγκολλημένου δείγματος. Οι εικόνες ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Όπως προκύπτει, οι θραυσιγενείς επιφάνειες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού εμφανίζουν ένα μικτό τύπο θραύσης, δηλαδή παρουσιάζονται περιοχές όλκιμης και ψαθυρής θραύσης. Χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης είναι η εμφάνιση κρατήρων (dimples) και σπηλαιώσεων (cleavages), ενώ της ψαθυρής θραύσης είναι η εμφάνιση αποσχίσεων (river patterns). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η θραύση του συγκολλημένου δοκιμίου επήλθε στο μέταλλο βάσης και όχι στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Μέσω της συγκριτικής μελέτης των θραυσιγενών επιφανειών του αρχικού δείγματος και του συγκολλημένου, προκύπτει ότι οι όλκιμες περιοχές υπερισχύουν των ψαθυρών και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο, το ποσοστό της όλκιμης θραύσης είναι μεγαλύτερο στο αρχικό υλικό, φτάνοντας το 87% περίπου (το ποσοστό είναι ενδεικτικό και προέκυψε με επεξεργασία της εικόνας της θραυστογραφίας στο πρόγραμμα image analyzer). Αντίστοιχα, το ποσοστό της όλκιμης θραύσης στο συγκολλημένο υλικό ήταν 79%. Η αυξημένη συμμετοχή της ψαθυρής θραύσης στο συγκολλημένο δοκίμιο, σε σχέση με το αρχικό υλικό, δεικνύει την μειωμένη ολκιμότητα του συγκολλημένου υλικού. Τέλος, η μεγαλύτερη ολκιμότητα του αρχικού δείγματος, οφείλεται επίσης και στο γεγονός ότι οι σπηλαιώσεις, όπως και η διάμετρος των κρατήρων είναι μεγαλύτερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

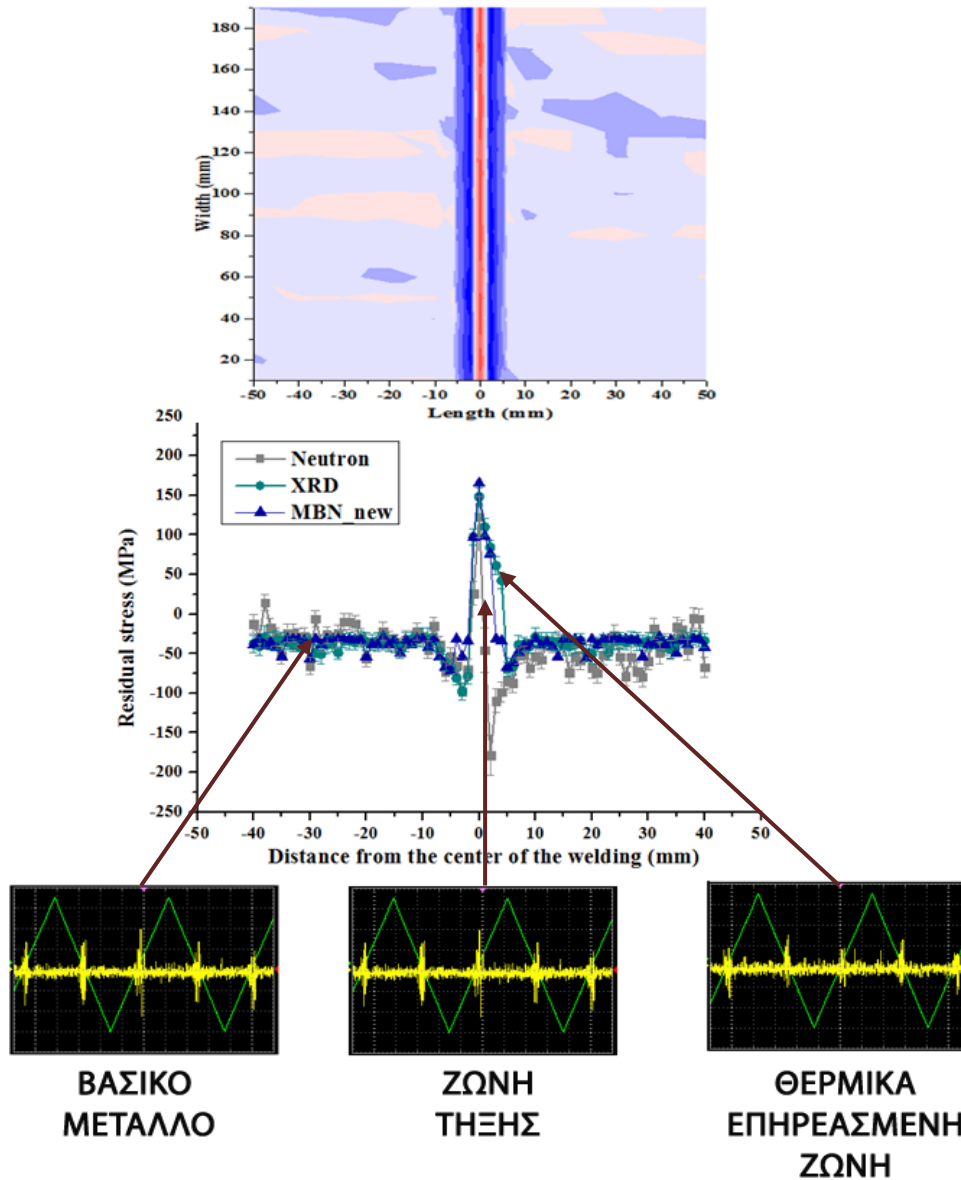
Κύριος στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μαγνητική τεχνική Barkhausen. Τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μαγνητικής τεχνικής, με αυτά που προέρχονται από τις πειραματικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους περιθλασιμετρίας ακτίνων X και νετρονίων, επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία της μαγνητικής απόκρισης. Συγκεκριμένα, η απόκλιση των μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου από αυτές των άλλων δύο μεθόδων περίθλασης βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται με τις τιμές της περίθλασης νετρονίων και αυτό δικαιολογείται από το μεγάλο βάθος διείσδυσης της δέσμης νετρονίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι παραμένουσες τάσεις που προσδιορίζονται με τη μέθοδο των νετρονίων να αφορά μεγαλύτερο όγκο του υλικού. Η μαγνητική μέθοδος του θορύβου Barkhausen αποτελεί, εν αντιθέσει, μια επιφανειακή τεχνική μέτρησης και αυτό οδηγεί σε μια επιφανειακή προσέγγιση των παραμενουσών τάσεων, όπως συμβαίνει και στην τεχνική XRD.

5.2 Συσχέτιση κατανομής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων

Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων, στην εκάστοτε ζώνη συγκόλλησης, σχετίζεται άμεσα με τις μεταβολές των τιμών της μαγνητικής απόκρισης (εικόνα 5-1). Σημαντικές διακυμάνσεις των τιμών MBNrms παρατηρήθηκαν την επιφάνεια κάθε συγκολλημένου δείγματος. Είναι σαφές ότι ο μαγνητικός θόρυβος παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του στη ζώνη τήξης, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή κοντά στο κέντρο της συγκόλλησης. Η μαγνητική απόκριση μειώνεται ταχύτατα με την αύξηση της απόστασης από τη ζώνη αυτή με αποτέλεσμα η ελάχιστη τιμή του μαγνητικού θορύβου να παρουσιάζεται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Το μαγνητικό σήμα ήταν ελαφρώς ενισχυμένο στο μέταλλο βάσης, χωρίς να υπερβαίνει τις μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν στη ζώνη τήξης.

Επειδή ο χάλυβας, για τις εφαρμοζόμενες τιμές πεδίου, είναι θετικά μαγνητοσυστολικός, η μείωση του μαγνητικού θορύβου στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη αποδεικνύει την παρουσία θλιπτικών τάσεων στη ζώνη αυτή. Αντίθετα, στη ζώνη τήξης παρατηρείται αύξηση της μαγνητικής απόκρισης, η οποία με τη σειρά της επιβεβαιώνει την ύπαρξη

εφελκυστικών τάσεων σε αυτή τη ζώνη της συγκόλλησης. Συνεπώς, η ποιοτική αξιολόγηση της μαγνητικής απόκρισης ως προς τα γειτονικά ενεργά κέντρα διακύμανσης του μαγνητικού θορύβου, είναι ένδειξη της παρουσίας παραμενουσών τάσεων στο υπό εξέταση υλικό, και μπορούν να καταδείξουν το είδος (εφελκυστικές, θλιπτικές) αυτών.



Εικόνα 5-1: Συσχέτιση των τιμών των παραμενουσών τάσεων με τη μορφή, την ένταση και την κατανομή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

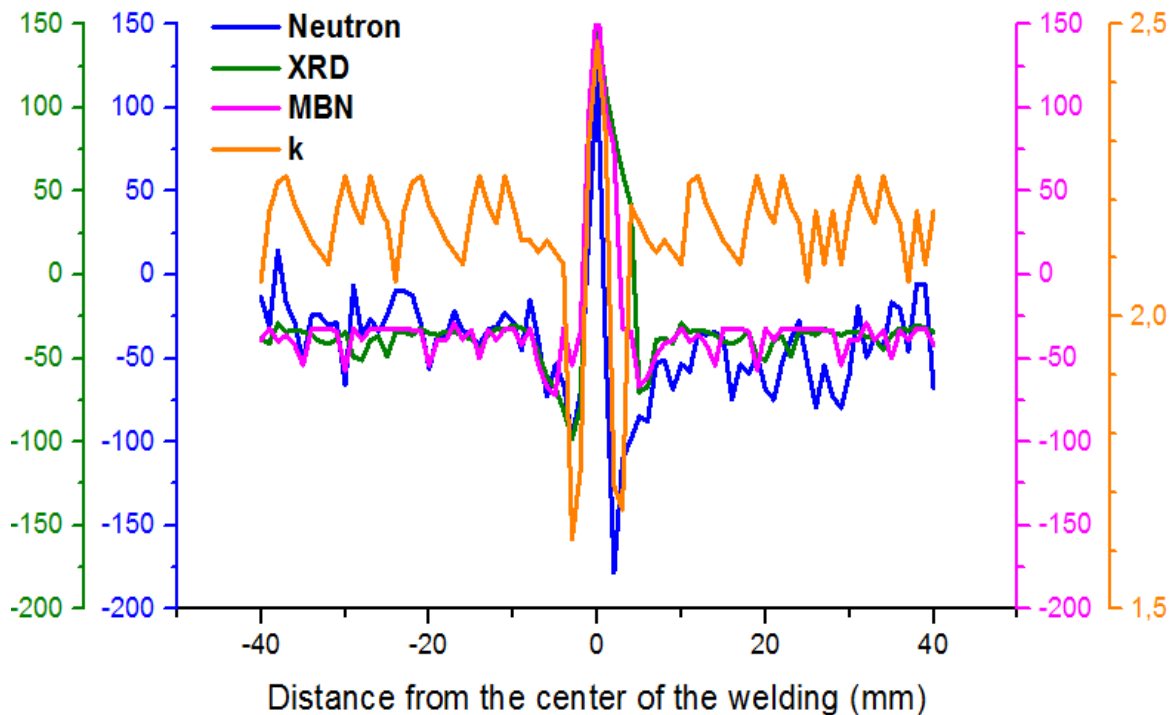
Να σημειωθεί ότι εξαιτίας των διαστασεολογικά περιορισμένων ζωνών της συγκόλλησης (ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη), η απομάκρυνση, από το συγκολλημένο δείγμα, δοκιμίων αντιπροσωπευτικών το ζωνών αυτών, για μετρήσεις στο περιθλασιόμετρο ακτίνων Χ, ήταν ιδιαίτερα δύσκολη. Επίσης, και η μέτρηση των

παραμενουσών τάσεων με τη χρήση της τεχνικής XRD ήταν επίπονη και αυξημένης δυσκολίας.

5.3 Συσχέτιση μαγνητικών παραμέτρων με την κατανομή των παραμενουσών τάσεων

Προσεγγίζοντας, μέσω των γωνιακών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου, την μαγνητική ανισοτροπία της εκάστοτε ζώνης της συγκόλλησης, παρατηρούμε ότι, αν και το μέταλλο βάσης παρουσιάζεται μακροσκοπικά ισότροπο (η γωνιακή απόκριση του θορύβου παριστάνεται γραφικά με κύκλο), οι άλλες δύο ζώνες της συγκόλλησης (ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη) παρουσιάζονται μη-ισότροπες μαγνητικά, δηλ. η διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου επηρεάζει τη μαγνητική απόκριση του θορύβου. Στηριζόμενοι, στη μορφή του πολικού διαγράμματος που περιγράφει τη γωνιακή εξάρτηση του μαγνητικού θορύβου από το επιβαλλόμενο πεδίο, συμπεραίνουμε ότι οι τάσεις κατανέμονται κάθετα στη ρίζα της συγκόλλησης.

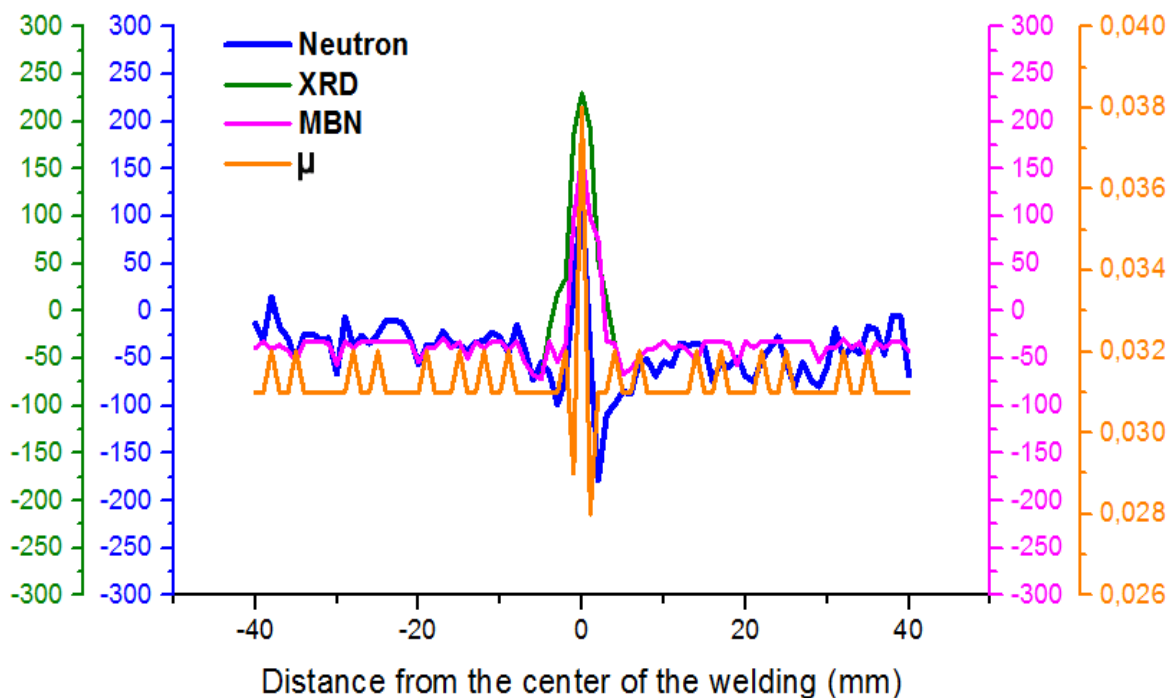
Για να διερευνήσουμε περισσότερο την επίδραση της ανισότροπης συμπεριφοράς της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, θα μελετήσουμε τη μεταβολή του παράγοντα ανισοτροπίας k ($k=(\alpha+\beta/\beta)$) σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.



Εικόνα 5-2: Συσχέτιση των τιμών των παραμενουσών τάσεων με τον παράγοντα ανισοτροπίας.

Παρατηρούμε ότι ο παράγοντας ανισοτροπίας παρουσιάζει μια συνεχή μονοτονική συμπεριφορά με τις τιμές των παραμενουσών τάσεων που προσδιορίστηκαν με τις άλλες μεθόδους περίθλασης και τον μαγνητικό θόρυβο Barkhausen. Η σταθερή αυτή ποιοτική αναλογία δηλώνει ότι οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν τόσο τη συνιστώσα ανισοτροπίας (α) όσο και την ισότροπη συνιστώσα (β) της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου. Αυτό σημαίνει, ότι όταν αυξάνει η τιμή των τάσεων σε μία περιοχή, την αύξηση της τιμής της συνιστώσας α αντισταθμίζει η μείωση της τιμής της συνιστώσας του β . Στην εικόνα 5-2, ωστόσο, παρατηρείται μια σημαντική απόκλιση των τιμών του παράγοντα k σε ότι αφορά τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στο περιορισμένο εύρος της ζώνης σε συνδυασμό με το μεγάλο, ως προς τη ζώνη αυτή, εμβαδό της επιφάνειας του αισθητήρα.

Όμοια με τον παράγοντα ανισοτροπίας, θα διερευνήσουμε την επίδραση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας (κλίση του βρόχου υστέρησης) σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.



Εικόνα 5-3: Συσχέτιση των τιμών των παραμενουσών τάσεων με τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας παρουσιάζουν μια συνεχή μονοτονική συμπεριφορά με τις τιμές των παραμενουσών τάσεων που προσδιορίστηκαν με τις άλλες μεθόδους περίθλασης και τον μαγνητικό θόρυβο Barkhausen. Η σταθερή αυτή ποιοτική αναλογία δηλώνει ότι η αυτή η μαγνητική

παράμετρος, ως ενδογενής ιδιότητα του υλικού, προσεγγίζει αξιόπιστα την κατανομή των παραμενουσών τάσεων. Στην εικόνα 5-3, παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με τον παράγοντα ανισοτροπίας, η απόκλιση των τιμών στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη δεν είναι τόσο μεγάλη.

5.4 Συσχέτιση μικροδομικών αλλαγών με τις μαγνητικές μετρήσεις και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το βασικό μέταλλο παρουσίαζε ενδιάμεσες τιμές θορύβου. Η ένταση του θορύβου στο βασικό μέταλλο παραμένει σταθερή. Εφόσον το μέταλλο βάσης, αποτελεί τη θερμικά ανεπηρέαστη ζώνη της συγκόλλησης, δεν αναμένεται καμία αλλαγή στη μικροδομή και στη μορφολογία των κόκκων.

Η προηγούμενη υπόθεση επιβεβαιώνεται με τον μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό του συγκολλημένου δείγματος, κυρίως μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Το μέταλλο βάσης χαρακτηρίζεται από ισαξονικούς φερριτικούς και περλιτικούς κόκκους. Ο περλίτης ως μικροδομικό συστατικό αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη. Σε αντίθεση με το φερρίτη που παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά, ο σεμεντίτης, ως καρβίδιο αποτελεί ισχυρό σημείο αγκύρωσης για τα μαγνητικά δίπολα κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Αυτό σημαίνει ότι παρεμποδίζει τη μαγνήτιση του υλικού. Το προηγούμενο συμπέρασμα σε συνδυασμό με την υψηλή ποσοστιαία συμμετοχή του φερρίτη συμβάλλει στις ενδιάμεσες τιμές του μαγνητικού θορύβου στη ζώνη αυτή.

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι ιδιαίτερα περιορισμένη και αποτελείται από ανομοιομορφα μεγεθυμένους φερριτικούς και περλιτικούς κόκκους. Η ζώνη χαρακτηρίζεται από ισχυρή διαβάθμιση συγκέντρωσης χημικών στοιχείων (partitioning). Θα αναμένονταν η παρουσία υψηλότερων τιμών μαγνητικού θορύβου Barkhausen από το βασικό μέταλλο, εξαιτίας της αυξημένης ποσοστιαίας συμμετοχής του περλίτη, συγκριτικά με το αρχικό υλικό. Εν αντιθέσει, η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη τιμή του μαγνητικού θορύβου σε όλη την έκτασή της. Μέσω του μεταλλογραφικού χαρακτηρισμού στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, παρατηρούμε της παρουσία σφαιροποιημένου σεμεντίτη στη μητρική φάση του φερρίτη. Η σφαιρική μορφολογία του καρβιδίου μειώνει σημαντικά το ενεργειακό φράγμα που απαιτείται να υπερβούν τα μαγνητικά δίπολα για να προσανατολιστούν στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Η παρουσία χοντροκρυσταλλικού περλίτη στη ζώνη αυτή σε συνδυασμό με τους διευρυμένους κόκκους του φερρίτη έχουν

ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της μαγνητικής απόκρισης του θορύβου στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Τέλος, η ζώνη τήξης παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του μαγνητικού θορύβου καθώς χαρακτηρίζεται από ομάδες δενδριτών, μη-ομότροπα προσανατολισμένων. Η σταυροειδής αυτή μορφολογία, με τις γωνιώδεις μη ισαξονικές απολήξεις συντελεί, στην ιδιαιτέρως υψηλή τιμή της μαγνητικής απόκρισης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο ρυθμός ψύξης αποτελεί σημαντική παράμετρο στο σχηματισμό παραμενουσών τάσεων σε συνολική κλίμακα στο συγκολλημένο υλικό. Οι περισσότερες τάσεις που αρχικά αναπτύσσονται στο υλικό ανακουφίζονται όταν ακόμη οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στα μετέπειτα στάδια της ψύξης παραμένουν όταν το υλικό έχει κρυσταλλωθεί και εγκλωβίζονται σε αυτό. Ως αποτέλεσμα, στο συγκολλημένο υλικό, παρουσιάζονται περιοχές στην επιφάνεια του υλικού σε κατάσταση μόνιμης θλίψης που εξισορροπούνται από τις εσωτερικές εφελκυστικές τάσεις. Υψηλοί ρυθμοί απόψυξης, εν γένει, αυξάνουν αυτές τις παραμένουσες τάσεις και η κατανομή τους είναι έντονη, καθώς παρουσιάζουν ένα σχεδόν παραβολικό προφίλ παραμενουσών τάσεων.

Συγκεκριμένα, το τηκόμενο υλικό στη ζώνη τήξης, λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας, τείνει να διασταλεί. Καθώς ψύχεται, η συνεπακόλουθη συστολή του παρεμποδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης μεταβολής των διαστάσεων της θερμαινόμενης ζώνης εμφανίζεται σαν ελαστική παραμόρφωση (στα επίπεδα του ορίου διαρροής), η οποία οδηγεί τελικά στην εμφάνιση της παραμένουσας τάσης. Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων είναι αποτέλεσμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο συγκολλημένο υλικό λόγω της διαμήκουσ συστολής. Η παραπάνω διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών τιμών της εφελκυστικής τάσης στην περιοχή γύρω από τη ραφή της συγκόλλησης, που σταδιακά μειώνονται, για να γίνουν θλιπτικές σε απόσταση από την γραμμή συγκόλλησης ίση προς μερικές φορές το πλάτος του μετάλλου κόλλησης. Συνεπώς, οι εφελκυστικές τάσεις στη ζώνη τήξης αντισταθμίζονται από τις θλιπτικές τάσεις που παρουσιάζονται στο βασικό μέταλλο. Οι γειτνιάζουσες, στη ζώνη τήξης, θερμικά επηρεασμένες ζώνες, αποτελούν τις περιοχές ομαλής μετάβασης.

5.5 Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων με τη μικροδομή, τις μαγνητικές ιδιότητες και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων

Παρατηρώντας τη διακύμανση των τιμών της σκληρότητας Vickers, σε κάθε ζώνη συγκόλλησης, προκύπτει μια μονοτονική συσχέτιση μεταξύ της μηχανικής ιδιότητας και της μαγνητικής απόκρισης που απορρέει πρώτον από τις μικροδομικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στις ζώνες τις συγκόλλησης και δεύτερον από την επίδραση της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου υλικού (όριο διαρροής, μέγιστη εφελκυστική τάση θραύσης, ολκιμότητα).

Η ελάχιστη τιμή μικροσκληρότητας αποδίδεται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη εξαιτίας της μορφολογικής και χημικής ομοιογένειας, ενώ όπως συμβαίνει και με τη μαγνητική απόκριση, οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στη ζώνη τήξης. Η αύξηση της μηχανικής σκληρότητας (διαχωρισμός του όρου από τη μαγνητική σκληρότητα) οδηγεί στη μείωση της ολκιμότητας του υλικού. Παρατηρώντας τις θραυσίγενείς επιφάνειες είναι εμφανής η αύξηση του ποσοστού ψαθυρής θραύσης μέσω της υψηλής ποσοστιαίας συμμετοχής αποσχίσεων.

5.6 Συνοπτικά συμπεράσματα

Η μαγνητική τεχνική του θορύβου Barkhausen αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων και η μαγνητική απόκριση σχετίζεται άμεσα με τις μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων και των μικροδομικών αλλαγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Λόγω της καλής συγκολλησιμότητας του υποευτηκτοειδούς χάλυβα, η συγκόλλησή του μέσω της μη συμβατικής μεθόδου της συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding, EBW) παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον καθώς, όπως είναι γνωστό, αποδίδει το βέλτιστο συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων. Αυτό οφείλεται στις μικρές θερμικές διακυμάνσεις και ομοιόμορφες μικροπαραμορφώσεις που χαρακτηρίζουν τον τύπο αυτό συγκόλλησης, που ελαχιστοποιούν την ασθενή θερμικά επηρεασμένη ζώνη και ενισχύουν την ομοιομορφία και την λεπτότητα της μικροδομής.

Στη συνέχεια, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και μελλοντική εργασία σε ό,τι αφορά την επιπρόσθετη μελέτη τόσο του συγκολλημένου υλικού όσο και των δυνατοτήτων των μαγνητικών τεχνικών σε διαφορετικά είδη συγκόλλησης στον υπάρχοντα AISI 1008 χάλυβα.

Αρχικά, αναγκαία κρίνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας στο συγκολλημένο υλικό, με σκοπό τη συσχέτιση της διακύμανσης των τιμών της μαγνητικής απόκρισης με της παρουσία των παραμενουσών τάσεων σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης και τις μεταβολές τόσο σε επίπεδο μικροδομής όσο και σε επίπεδο μεταβολών των μηχανικών ιδιοτήτων.

Εν συνεχεία, επειδή η μαγνητική διαπερατότητα είναι μια ενδογενής ιδιότητα του υλικού, προτείνεται η χρήση των τιμών της, ως τη μαγνητική παράμετρο συσχέτισης με τις τάσεις, στην καμπύλη βαθμονόμησης του μαγνητικού θορύβου.

Κρίνεται χρήσιμη η εξέταση του δείγματος μετά την εφαρμογή δυναμικών καταπονήσεων (κόπωσης) και ερπυσμού καθώς αποτελέσματα μπορούν να συσχετίσουν άμεσα με αυτά του εφελκυσμού και των μαγνητικών αποκρίσεων των μαγνητικών μετρήσεων.

Ενδιαφέρον επίσης προκαλεί η δοκιμή δυσθραυστότητας (charpy tests) καθώς αποτελούν χρήσιμο υλικό ως προς τη συγκριτική μελέτη με την αντοχή του συγκολλημένου υλικού και της μαγνητική απόκριση αυτού.

Με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων δύναται να προσδιοριστούν οι παραμένουσες τάσεις στο συγκολλημένο υλικό και να προκύψουν συγκριτικά αποτελέσματα με τις υπάρχουσες μετρήσεις.

Επιπλέον, θα μπορούσαν ακόμη να πραγματοποιηθούν και άλλες συγκολλήσεις μέσω της μεθόδου δέσμης ηλεκτρονίων, λαμβάνοντας διαφορετικές παραμέτρους μη συμβατής συγκόλλησης με στόχο την μελέτη της αξιοπιστίας των μαγνητικών τεχνικών να προσδιορίσουν τις παραμένουσες τάσεις συγκριτικά με τις μεθόδους περίθλασης.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσαν ακόμη να πραγματοποιηθούν και άλλες συγκολλήσεις π.χ. αυτογενείς συγκολλήσεις τήξης ή υψηλής ενέργειας και εφαρμογή των αντίστοιχων μαγνητικών τεχνικών και μεθόδων περίθλασης με στόχο τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε συνδυασμό με τη μεταλλογραφική ανάλυση των αναπτυσσόμενων δομών και τη μηχανική απόκριση των ιδιοτήτων των συγκολλημένων υλικών.

Τέλος, δύναται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της αναπτυσσόμενης μικροδομής εντός της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, μέσω γεωμετρικών μοντέλων σε συνδυασμό με αριθμητικά, θερμομηχανικά και μεταλλουργικά μοντέλα (τα οποία διερευνώνται από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα), με στόχο τον πλήρη δομικό χαρακτηρισμό των ζωνών της συγκόλλησης, ώστε να είναι δυνατό να προσδιοριστεί η καμπύλη βαθμονόμησης της μαγνητικής τεχνικής του θορύβου Barkhausen που αφορά τις παραπάνω ζώνες. Με τον τρόπο αυτό θα είναι εφικτός ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε λιγότερο χρόνο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] V. Hauk: Structural and residual stress Analysis by Nondestructive Methods, Elsevier, (1997), pp.23.
- [2] E. Kloos: Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen, Z. Werkstofftech. 10 (1979), pp. 293-332.
- [3] P. J. Withers, H. K. Bhadeshia: Residual Stress, Part 1: Measurement Techniques. Materials Science and Technology 17(4) (2001), 355–365.
- [4] M. Lindgren T. Lepistö: Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel, NDT & E International, Vol. 36, Issue 5, 1 July 2003, pp. 280
- [5] N.S. Rossinia, M. Dassistia, K.Y. Benyounisb, A.G. Olabib: Methods of measuring residual stresses in components, Materials & Design, Vol. 35, March 2012, pp. 572-588
- [6] G. S. Schajer: Practical Residual Stress Measurement Methods, Wiley, (2013), pp. 23.
- [7] Ι. Χρυσουλάκης , Δ.Ι. Παντελής: Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.
- [8] Γ. Δ. Παπαδημητρίου: Γενική Μεταλλογνωσία, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989.
- [9] Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος: Φυσική μεταλλουργία, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2007.
- [10] D. William, Jr. Callister: Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2008.
- [11] Ε. Χριστοφόρου: Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001.
- [12] J.A. Pérez-Benítez , J.H. Espina-Hernández, P. Martínez-Ortiz, A.F. Chávez-González, J.M. De La Rosa: Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model, Journal of Magnetism & Magnetic Materials, vol. 347, 2013, pp. 51-60.
- [13] A. Ktena, E. Hristoforou, G.J.L. Gerhardt, F.P. Missell, F.J.G. Landgraf, D.L. Rodrigues Jr, M. Alberteris-Campos: Barkhausen noise as a microstructure characterization tool, Physica B: Condensed Matter, to be published.

- [14] P. Wang, X. Ji, L. Zhu, G. Tian, E. Yao: Stratified analysis of the magnetic Barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back propagation neural network, *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 201, 2013, pp. 421–427.
- [15] N. Kasai, H. Koshino, K. Sekine, H. Kihira, M. Takahashi: Study on the effect of elastic stress and microstructure of low carbon steels on Barkhausen noise, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, 2013, pp. 277-285.
- [16] O. Stupakov: Local Non-contact Evaluation of the ac Magnetic Hysteresis Parameters of Electrical Steels by the Barkhausen Noise Technique, *Journal of Nondestructive Evaluation*, to be published.
- [17] C.H. Henager Jr., J.S. McCloy, R. Ramuhalli, D.J. Edwards, S. Hu, Y. Li, Investigation of magnetic signatures and microstructures for heat-treated ferritic/martensitic HT-9 alloy, *Acta Materialia*, vol. 61, 2013, pp. 3285-3296.
- [18] F.A. Franco, M.F.R. González, M.F. De Campos, L.R. Padovese: Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, 2013, pp. 93-103.
- [19] G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš : Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels, *NDT & E International*, vol. 54, 2013, pp. 107-114.
- [20] P. Haušild, K. Kolařík, M. Karlík: Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement, *Materials & Design*, vol. 44, 2013, pp. 548-554.
- [21] H. Wang, C. Li, T. Zhu, B. Cai, G. Huo, N. Mohamed: Effect of ball scribing on magnetic Barkhausen noise of grain-oriented electrical steel, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 29, 2013, pp. 673-677.
- [22] L. Batista, U. Rabe, S. Hirsekorn: Magnetic micro- and nanostructures of unalloyed steels: Domain wall interactions with cementite precipitates observed by MFM, *NDT & E International*, vol. 57, 2013, pp. 58-68.
- [23] J. Pal'a, J. Bydžovský: Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 46, 2013, pp. 866-870.

- [24] T.W. Krause, L. Clapham, A. Pattantyus, D.L. Atherton: Investigation of the stress-dependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen noise, *Journal of Applied Physics*, vol. 79, 1996, pp. 4242-4252.
- [25] T.W. Krause, L. Clapham, D.L. Atherton: Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise, *Journal of Applied Physics*, vol. 75, 1994, pp. 7983-7988.
- [26] T.W. Krause, K. Mandal, D.L. Atherton: Modeling of magnetic Barkhausen noise in single and dual easy axis systems in steel, *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 195, 1999, pp. 193-205.
- [27] C.G. Stefanita, D.L. Atherton, L. Clapham: Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel, *Acta Materialia*, vol. 48, 2000, pp. 3545-3551.
- [28] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel, *NDT & E International*, vol. 34, 2004, pp. 507-514.
- [29] C.G. Stefanita, L. Clapham, J.K. Yi, D.L. Atherton: Analysis of cold rolled steels of different reduction ratio using the magnetic Barkhausen noise technique, *Journal of Materials Science*, vol. 36, 2001, pp. 2795-2799.
- [30] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: Influence of Lüders bands on magnetic Barkhausen noise and magnetic flux leakage signals, *Journal of Materials Science*, vol. 37, 2002, pp. 2441-2446.
- [31] M. Caldas-Morgan, L.R. Padovese: Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method, *NDT and E International*, vol. 45, 2012, pp. 148-155.
- [32] A. Bükki-Deme, I.A. Szabó, C. Cserháti: Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 322, 2010, pp. 1748-1751.
- [33] O. Stupakov, T. Uchimoto, T. Takagi: Magnetic anisotropy of plastically deformed low-carbon steel, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, 2010, art. no. 195003.
- [34] M. Alberteris Campos, J. Capó-Sánchez, J. Pérez Benítez, L.R. Padovese: Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise, *NDT & E International*, vol. 41, 2008, pp. 656-659.

- [35] J.H. Espina-Hernández, J.A. Pérez-Benítez, F. Caleyó, T. Baudin, A.L. Helbert, J.M. Hallen: Barkhausen noise measurements give direct observation of magnetocrystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, 2013, art. no. 392001.
- [36] F. Kováč, M.D. Džubinský, Y. Sidor: Columnar grain growth in non-oriented electrical steels, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 269, 2004, pp. 333–340.
- [37] A. Martínez-de-Guerenu, K. Gurruchaga, F. Arizti: Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, 2007, pp.e842 -e845.
- [38] K. Gurruchaga, A. Martínez-De-Guerenu, M. Soto, F. Arizti: Magnetic Barkhausen noise for characterization of recovery and recrystallization, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, 2010, pp. 513-516.